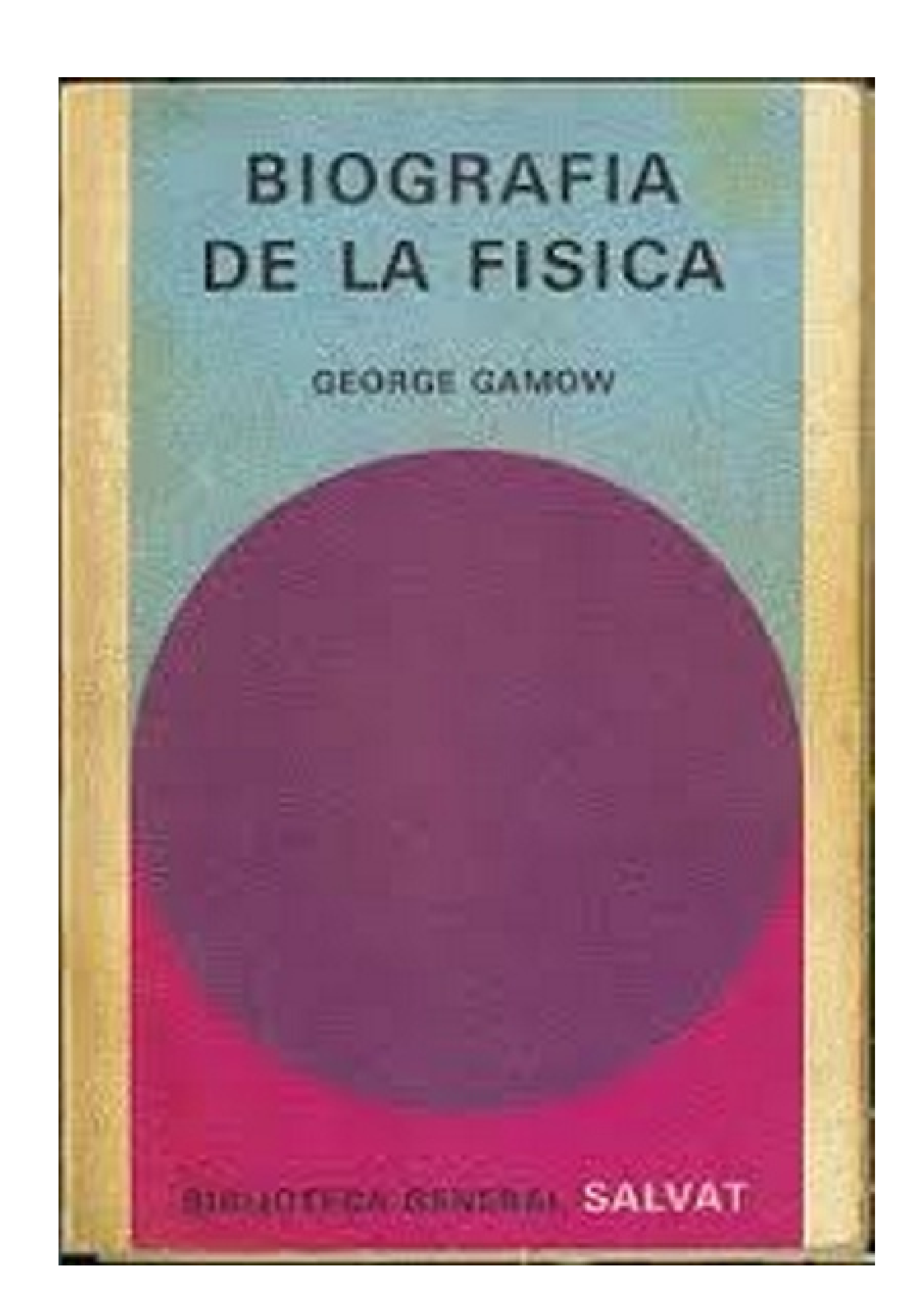

BIOGRAFIA
DE LA FISICA
GEORGE GAMOW
BIBLIOTECA GENERAL SALVAT

Índice

Prólogo del autor

1. La aurora de la Física
2. Las edades oscuras y el Renacimiento
3. Dios dijo: "Que Newton sea"
4. El calor como energía
5. La edad de la electricidad
6. La revolución relativista
7. La ley de los cuanta
8. El núcleo atómico y las partículas elementales

Prólogo

Hay dos tipos de libros sobre la ciencia física. Uno es el de los libros de texto encaminados a enseñar al lector los hechos y las teorías de la física. Los libros de esta clase suelen omitir todos los aspectos históricos del desarrollo de la ciencia; la única información sobre los grandes científicos del pasado y presente se limita a los anos de su nacimiento y muerte puestos entre paréntesis detrás del nombre. El otro tipo es esencialmente histórico, consagrado a los datos biográficos y al análisis del carácter de los grandes hombres de ciencia y no hacen más .que enumerar sus descubrimientos suponiendo que el lector, que estudia la historia de una ciencia determinada, ya está al tanto de esta ciencia misma.

En el presente libro, he intentado seguir un camino intermedio exponiendo lo mismo el proceso de Galileo que las leyes fundamentales de la mecánica por él descubiertas o presentando mis recuerdos personales sobre Niels Bohr junto con una detallada discusión del modelo de átomo de este físico. La exposición en cada uno de los ocho capítulos está centrada en torno de una sola gran figura o a lo más de dos, con otros físicos de la época y sus contribuciones a manera de Pondo del cuadro. Esto explica la omisión de muchos nombres que se encontrarían en la mayoría de los libros de historia de la Física y la omisión de mochos temas que son obligados en los corrientes libros de texto. La finalidad de este libro es dar al lector el sentimiento de lo que, es la Física y qué Base de hombres son los físicos, interesándole bastante para que prosiga sus estudios y busque otros libros más sistemáticos sobre el tema.

Espero que este libro servirá para que jóvenes lectores (y acaso algunos viejos) sientan el impulso de estudiar Física; ésta es su finalidad principal.

GEORGE GAMOW

Universidad de Colorado, 1 de junio de 1960.

Capítulo 1
La aurora de la física

Es muy difícil rastrear el origen de la ciencia física, tan difícil como rastrear el origen de muchos grandes ríos. Unas cuantas pequeñas fuentes que burbujean bajo el verde follaje de la vegetación tropical o gotean bajo las verdes cubiertas de musgo en el estéril país septentrional; unos cuantos arroyos que descienden alegremente por las laderas de la montaña y se reúnen para formar riachuelos que a su vez se juntan y forman corrientes bastante grandes para merecer el nombre de "río". Los ríos se hacen cada vez mayores, alimentados por numerosos tributarios, y, finalmente, se convierten en poderosas corrientes —sea el Mississippi o el Volga, el Nilo o el Amazonas— que vierten sus aguas en el océano.

Las fuentes que dieron origen al gran rio de la ciencia física estaban diseminadas por toda la superficie de la Tierra habitada por el *homo sapiens*, es decir, el hombre pensante. Parece, sin embargo, que la mayoría estaban concentradas en la punta sur de la península balcánica, habitada por el pueblo que ahora llamamos los "antiguos griegos" o al menos así nos parece a los que heredamos la cultura de estos primeros "intelectuales". Es interesante labor que, mientras otras naciones antiguas, como Babilonia y Egipto, contribuyeron en gran medida al temprano desarrollo de las matemáticas y la astronomía, fueron completamente estériles respecto al desarrollo de la física. La explicación posible de esta deficiencia, en comparación con la ciencia griega, es que los dioses de Babilonia y Egipto vivían arriba, entre las estrellas, mientras los dioses de los antiguos griegos vivían en una elevación de sólo unos 10.000 pies, en la cima del monte Olimpo y, por tanto, mucho cerca de los problemas de tejas abajo. Según una legenda, el término “magnetismo" proviene del nombre de un pastor griego, $\mathrm{M}\alpha\gamma\upsilon\nu o$ que quedó sorprendido al observar que el regatón de hierro de su bastón era atraído por una piedra (mineral de hierro magnético) que había en el borde del camino. Análogamente el término "electricidad" proviene de la palabra griega $\eta\lambda\varepsilon\kappa\tau\rho o\nu$ (ámbar), a causa de que tal vez otro pastor helénico, al tratar de pulir un trozo de

ámbar frotándolo sobre la lana de una de sus ovejas, observó que poseía la misteriosa propiedad de atraer pequeños trozos de madera.

1. La ley pitagórica de las cuerdas

Mientras que estos legendarios descubrimientos difícilmente encontrarían base para un litigio legal sobre la prioridad, el descubrimiento del filósofo griego Pitágoras, que vivió a mediados del siglo VI antes de Cristo está bien documentado. Convencido de que el mundo está gobernado por los números, investigó la relación entre las longitudes de las cuerdas en los instrumentos musicales que producen combinaciones armónicas de sonidos.

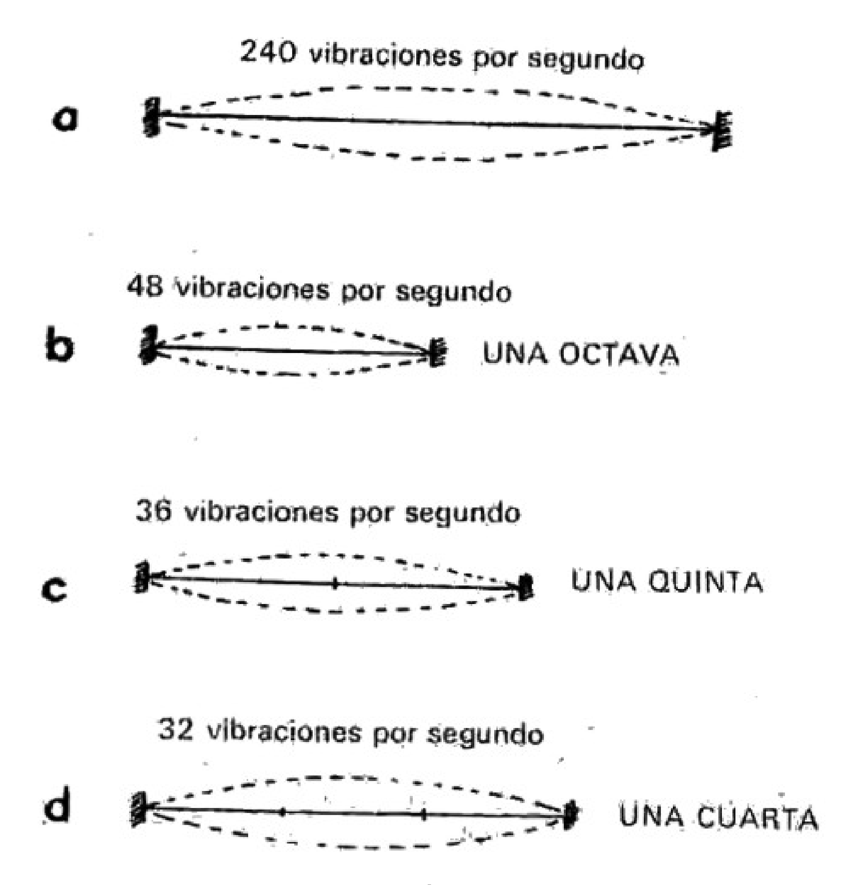


Figura 1. Ley pitagórica de las cuerdas

A este propósito empleó el llamado "monocordio", es decir, una sola cuerda cuya longitud se puede variar y someter a diferentes tensiones producidas por un peso suspendido a su extremo. Usando el mismo peso y variando la longitud de la cuerda, vio que los pares de sonidos armónicos se producían cuando las longitudes

de la cuerda estaban en relaciones numéricas sencillas. La razón de longitud 2:1 correspondía a lo que hoy llamamos "octava'"; la razón 3:2 a una "quinta", la razón 1:3 a una "cuarta". Este descubrimiento fue probablemente la primera formulación matemática de una ley física y se puede muy bien considerar como el primer paso en el desarrollo de lo que boy conocemos como física teórica. En la moderna terminología física podemos formular de nuevo el descubrimiento de Pitágoras diciendo que la frecuencia, e s decir, el número de vibraciones por segundo de una cuerda determinada, sujeta a una tensión dada, es inversamente proporcional a su longitud. Así, si la segunda cuerda (Figura 1 b) es la mitad de larga que la primera (Figura 1a), su frecuencia será dos veces mayor. Si las longitudes de las dos cuerdas están en la proporción de 3:2 ó 4:3, sus frecuencias estarán en la proporción de 2:3 ó 3:4 (Figura 1 c, d). Como la parte del cerebro humano que recibe las señales de los nervios del oído está construida de tal forma que una sencilla relación de frecuencia como 3:4 proporciona "placer", mientras que una compleja como 137:171 "desplacer" (hecho que tendrán que explicar los futuros fisiólogos del cerebro), la longitud de las cuerdas que dan un acorde perfecto deben estar en una relación numérica sencilla. Pitágoras intentó dar un paso más al sugerir que, como el movimiento planetas "debe ser armonioso", sus distancias de la Tierra deben estar en las mismas relaciones que la longitud de las cuerdas (bajo la misma tensión) que producen las siete notas fundamentales de la lira, el instrumento musical nacional de los griegos. Esta idea ha sido probablemente el primer ejemplo de lo que ahora se llama a menudo "teoría física patológica".

2. Demócrito, el atomista

Otra importante teoría física que en la moderna terminología podría ser llamada "una teoría sin ninguna base experimental" pero que resultó un “sueño que se torna realidad", fue propuesta por otro griego antiguo, el filósofo Demócrito, que vivió, pensó y enseñó hacia el año 400 antes de Cristo. Demócrito concibió la idea de que todos los cuerpos materiales son agregados de innumerables partículas tan pequeñas que no son visibles por los ojos humanos. Llamó a estas partículas átomos o indivisibles ($\alpha\tau o\mu o\sigma$) en griego, porque creía que representaban la última fase de la división de los cuerpos materiales en partes cada vez más

pequeñas. Creía que hay cuatro clases diferentes de átomos: los átomos de la piedra, pesados y secos; los átomos de agua, pesados y húmedos; los átomos de aire, fríos y ligeros, y los átomos de fuego, fugitivos y calientes. Por una combinación de estas cuatro diferentes clases de átomos se suponía que están hechas todas las materias conocidas. El suelo era una combinación de átomos de piedra y agua. Una planta que crece desde el suelo bajo la influencia de los rayos solares consistía en átomos de piedra y agua del suelo y los átomos del fuego procedían Sol. Por esta causa los átomos de madera seca que han perdido sus átomos de agua pueden arder, desprendiendo átomos de fuego (llamas) y dejando átomos de piedra (cenizas). Cuando ciertas clases de piedra (minerales metálicos) son puestas a la llama, los átomos de piedra se unen a los átomos de fuego produciendo las sustancias conocidas como metales. Los metales baratos, como el hierro, contienen muy pocos átomos de fuego y, por tanto, parecen bastante apagados mientras que el oro tiene el máximo de átomos de fuego y, por esta razón, es brillante y valioso. En consecuencia, si se pudiera añadir más átomos de fuego al simple hierro ¡se podría obtener el preciado oro!

Un estudiante que dijera todo esto en su examen de química elemental seguramente sería suspendido. Pero, aunque estos ejemplos particulares de la naturaleza de la transformación química eran, desde luego, erróneos, la idea fundamental de obtener un número casi ilimitado de sustancias diferentes, por una combinación de unos cuantos elementos químicos básicos era indudablemente correcta y ahora representa el fundamento de la química actual. Sin embargo, tardó veintidós siglos, desde la época de Demócrito a la de Dalton, en demostrarse su verdad.

3. La filosofía aristotélica

Uno de los gigantes del antiguo mundo griego fue un hombre llamada Aristóteles, que se hizo famoso por dos razones: primera, porque era un, verdadero genio; segunda, porque fue preceptor y más tarde protegido de Alejandro Magno de Macedonia. Había nacido en el año 384 antes de Cristo, en la ciudad colonial griega de Estagira, en el mar Egeo; su padre había sido médico de la Corte de la familia real de Macedonia. A la edad de diecisiete años se trasladó a Atenas y se unió a la

escuela filosófica de Platón, siendo un ardiente discípulo de Platón hasta la muerte de éste en el año 347 antes de Cristo. Después siguió un período de extensos viajes hasta que por fin regresó a Atenas y fundó una escuela filosófica llamada "peripatética" que se reunía en el Liceo. La mayor parte de las obras de Aristóteles conservadas, hasta nuestros días son los "tratados" que probablemente representan los textos de las lecciones que explicaba en el Liceo sobre diversas ramas de la ciencia. Son tratados de lógica y psicología, de la que fue el inventor, tratados sobre ciencia política y sobre diversos problemas biológicos, especialmente sobre la clasificación de las plantas y los animales.

Pero, mientras en todos estos campos hizo enormes descubrimientos que influyeron sobre el pensamiento humano durante dos milenios después de su muerte, probablemente su mayor contribución en el campo de la física fue la invención del nombre de esta ciencia que se deriva de la palabra $\Phi\psi\sigma\iota\sigma$ que significa naturaleza.

La deficiencia de la filosofía aristotélica en el estudio de los fenómenos físicos debe ser atribuida al hecho de que la gran inteligencia de Aristóteles no estaba orientada matemáticamente como la de otros muchos antiguos filósofos griegos. Sus ideas respecto al movimiento de los objetos terrestres y los cuerpos celestes probablemente hicieron más daño que beneficio al progreso de la ciencia. Cuando resurgió el pensamiento durante el Renacimiento, hombres como Galileo tuvieron que luchar duramente para libertarse del yugo de la filosofía aristotélica que, en aquel tiempo, considerada generalmente como "la última palabra del conocimiento", que hacía innecesarias más investigaciones sobre la naturaleza de las cosas.

4. La ley de la palanca de Arquímedes

Otro gran griego de la Antigüedad, que vivió un siglo después de la época de Aristóteles fue Arquímedes, padre de la ciencia mecánica, que nació en Siracusa, capital de la colonia griega de Sicilia. Como hijo de un astrónomo, se interesó muy pronto por las matemáticas, en las que adquirió una gran destreza y en el transcurso de su vida hizo una serie de contribuciones muy importantes en las diferentes ramas de la matemática. Su obra más importante en el dominio de la matemática pura fue el descubrimiento de la relación entre la superficie y el volumen de una esfera y el cilindro que la circunscribe; en efecto, de acuerdo con

su deseo, su tumba está señalada por una esfera inscrita en un cilindro. En su libro titulado *Psammites* (o calculadores de arena) expone el método de escribir números muy largos dando a cada cifra un "orden" diferente según su posición[1] y aplicándolo al problema de escribir el número de granos de arena contenidos en una esfera del tamaño de la Tierra.

En su famoso libro *Sobre el equilibrio de las superficies* (en dos volúmenes) desarrolla las leyes de la palanca y discute el problema de encontrar el centro de gravedad de cualquier cuerpo dado. A un lector moderno, el estilo con que Arquímedes escribía le parece más bien pesado y prolijo, semejante en muchos respectos al estilo de los libros de geometría de Euclides. De hecho, en la época de Arquímedes, la matemática griega estaba limitada casi exclusivamente a la geometría, porque el álgebra fue inventada mucho después por los árabes. Así, en diversas demostraciones en el campo de la mecánica y obras ramas de la física se valía de figuras geométricas más bien que formulando, como hacemos ahora, ecuaciones algebraicas. Como en la *Geometría* de Euclides, sobre la cual muchas veces un estudiante ha sudado en sus días escolares, Arquímedes formulaba las leyes fundamentales de la “estática" (es decir, el estudio del equilibrio) comenzando por formular los “postulados" y derivando de ellos cierto número de "proposiciones". Reproducimos el comienzo del primer volumen:

1. Pesos iguales a igual distancia están en equilibrio y pesos iguales a distancias desiguales no están en equilibrio sino que se inclinan hacia el peso que está a mayor distancia.

2. Si estando los pesos a cierta distancia y en .equilibrio, se añade algo a uno de ellos no hay equilibrio, sino que se 'inclinan hacia aquel al cual se ha añadido algo.

3. Análogamente, si se quita algo a uno de los pesos, no están en equilibrio, si que se inclinan hacia el peso del que no se ha quitado nada.

4. Si figuras planas iguales y similares coinciden cuando se superpone una a otra, sus centros de gravedad también coinciden.

5. Si las figuras son desiguales pero similares, sus centros de gravedad estarán situados similarmente. Entiendo por puntos situados similarmente en

[1] El método .que empleamos para escribir números en el sistema decimal; es decir, tantas unidades, tantas decenas, tantas centenas, tantos millares, etc.

relación con figuras similares, puntos tales que si se trazan, líneas a su través a los ángulos iguales, resultan ángulos iguales con los lados correspondientes.

6. Si dos pesos a cierta distancia están en equilibrio, otros dos pesos iguales a ellos estarán también en equilibrio a las mismas distancias. ¿No está claro?)

7. En una figura cuyo perímetro es cóncavo en la misma dirección, el centro de gravedad debe estar dentro de la figura.

A estos postulados siguen quince proposiciones derivadas de ellos por directos argumentos lógicos. Damos aquí las primeras cinco proposiciones, omitiendo su prueba y citamos las pruebas exactas de la sexta proposición que implica la ley fundamental de la palanca.

Proposiciones.

1. Pesos que se equilibran a igual distancia, son iguales.

2. Pesos desiguales a igual distancia no se equilibrarán, sino que se inclinarán hacia el peso mayor.

3. Pesos desiguales a distancias desiguales se equilibrarán (o más bien pueden equilibrarse) cuando el peso mayor está a menor distancia.

4. Si dos pesos iguales no tienen el mismo centro de gravedad, el centro gravedad de los dos juntos es el punto medio de la línea que une sus centros gravedad.

5. Si tres pesos iguales tienen sus centros de gravedad en línea recta a distancias iguales, el centro de gravedad del sistema coincidirá con el del peso del medio.

Veamos ahora la prueba de la proposición sexta, modernizándola ligeramente en obsequio del lector:

6. Dos pesos se equilibran a distancias recíprocamente proporcionales a sus pesos.

Supongamos que los pesos A y B son conmensurables[2] y los puntos representan sus centros de gravedad (Figura 2 a).

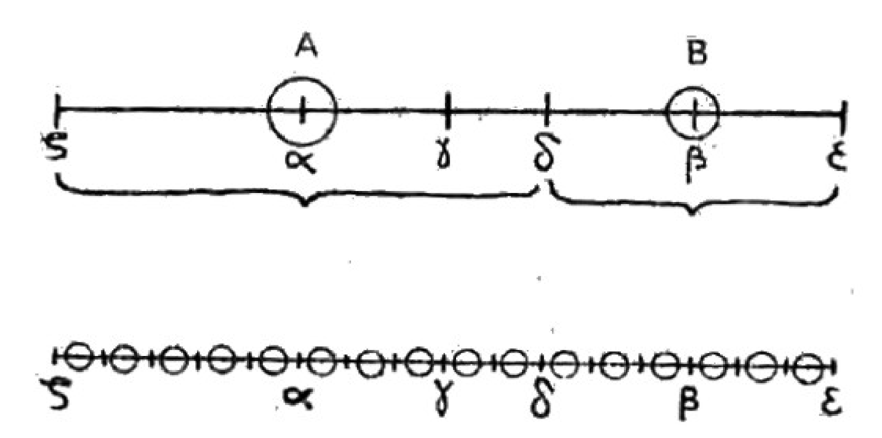


Figura 2. Prueba arquimédica de la ley de la palanca.

Tracemos la línea $\alpha\beta$ dividida en γ, de modo que

$$A : B = \beta\gamma : \gamma\alpha$$

Tenemos que probar que γ es el centro de gravedad de los dos pesos tomados en conjunto. Como A y B son conmensurables, también lo serán $\beta\gamma$ y $\gamma\alpha$. Supongamos que $\mu\sigma$ es la medida común de $\beta\gamma$ y $\gamma\alpha$. Hagamos $\alpha\delta$ igual a $\gamma\beta$ y $\alpha\sigma$ igual a $\gamma\beta$. Entonces $\alpha\sigma = \gamma\beta$, puesto que $\beta\sigma = \gamma\alpha$. Por tanto, $\sigma\delta$ está dividida en dos partes iguales en α como lo está $\delta\varepsilon$ en β. Así pues, $\sigma\delta$ y $\delta\varepsilon$ deben contener cada una a $\mu\upsilon$, un número par de veces.

Tomemos un peso Ω tal que Ω esté contenido varias veces en A como $\mu\upsilon$ está contenido en $\delta\varepsilon$, de donde:

$$\mathrm{A}:\Omega = \rho\sigma:\mu\upsilon$$

pero

$$\mathrm{B}:\mathrm{A}=\gamma\alpha:\beta\gamma=\delta\varepsilon:\sigma\delta$$

[2] Es decir, que la relación de los dos pesos está representada por una fracción racional como 5/3 ó 117/32

Por tanto, *ex aequalis* $\mathrm{B}:\Omega = \delta\varepsilon:\mu\upsilon$, o sea, que Ω está contenido varias veces en B como $\mu\upsilon$ es contenido en $\delta\varepsilon$: Así pues, Ω es una medida común de A y B.

Dividamos $\sigma\delta$ y $\delta\varepsilon$ en partes cada una igual a $\mu\upsilon$ y A y B en partes a Ω. Las partes de A serán, por tanto, iguales en número a las de $\sigma\delta$, y las partes de B serán iguales en número a las $\delta\varepsilon$.

Coloquemos una de las partes A en el punto medio de cada parte $\mu\upsilon$ y de $\sigma\delta$ y una de las partes de B en el punto medio de cada parte $\mu\upsilon$ de $\delta\varepsilon$ (Figura 2 b).

Entonces, el centro de gravedad de las partes de A situadas a igual distancia de $\sigma\delta$ estará en α, el punto medio de $\sigma\gamma$, y el centro de gravedad de las partes de B situadas a distancias iguales a lo largo de $\delta\varepsilon$ estará en B punto medio $\delta\varepsilon$. Pero el sistema formado por las partes Ω de A y B juntas es un sistema de pesos iguales en números situados a igual distancia a lo largo de $\sigma\varepsilon$. Y como $\sigma\alpha = \gamma\beta$ y $\alpha\gamma = \gamma\varepsilon$; así que γ es el punto medio de $\sigma\varepsilon$. Por tanto, γ es el .centro de gravedad del sistema colocado a lo largo de $\sigma\varepsilon$. Por tanto, A actuando en α y B actuando en β se equilibran sobre d punto γ.

Esta proposición es seguida de la séptima en la cual se prueba la misma tesis cuando los pesos son inconmensurables[3].

El descubrimiento del principio de la palanca y sus diversas aplicaciones produjo gran sensación en el mundo antiguo, como puede verse en la descripción dada por Plutarco en su "*Vida de Marcelo*", un general romano que capturó Siracusa durante la segunda guerra púnica y que fue en parte responsable del asesinato de Arquímedes, que había contribuido en gran medida a la defensa de la ciudad construyendo ingeniosas máquinas de guerra. Escribe Plutarco:

> *Arquímedes, que era pariente y amigo del rey Hierón de Siracusa, escribióle que con una potencia dada se puede mover un peso dado, y envalentonado, como suele decirse, por la fuerza de su demostración, declaró que si hubiera otro mundo y pudiera ir a él, podría mover éste. Hierón quedó asombrado y le pidió que pusiera en práctica su proposición y le mostrara algún gran peso*

[3] Es decir, cuando la relación de los dos pesos es un número irracional, como, por ejemplo √2,

movido por una ligera fuerza. Arquímedes, entonces, escogió un mercante de tres palos de la flota real que fue arrastrado a tierra gracias al esfuerzo de muchos hombres y después.de poner a bordo a muchos pasajeros y a la carga acostumbrada, se sentó a cierta distancia y sin gran esfuerzo, sino poniendo tranquilamente en movimiento, con su mano un sistema de poleas compuestas, lo arrastró hacia él tan suavemente como si estuviera deslizándose en el agua.

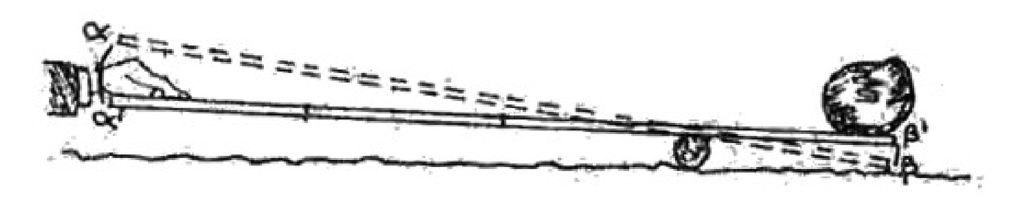


Figura 3. Si el brazo izquierdo de la palanca es tres veces más largo que el derecho, el movimiento del extremo izquierdo ($\alpha\alpha'$) es tres veces mayor que el movimiento del brazo derecho ($\beta\beta'$).

El principio de la palanca desempeña un papel importante en todos los caminos de la vida, desde el labrador que emplea una barra de hierro para mover un pesado peñasco, hasta la complicada maquinaria empleada en la ingeniería moderna. La ley de la palanca formulada por Arquímedes nos permite introducir el importante concepto mecánico de trabajo desarrollado por una fuerza actuante. Supongamos que tratamos de levantar una piedra pesada (fig. 3) usando una palanca de hierro con una relación entre sus brazos de $\alpha\gamma : \gamma\beta = 3 : 1$. Podemos, por presión sobre el extremo de la palanca, hacerlo con una fuerza tres veces menor que la fuerza de gravedad que actúa sobre la piedra. Es claro que cuando se eleva la piedra, por ejemplo, una pulgada, el extremo de la palanca desciende 3 pulgadas ($\beta\beta'$). Así deducimos que el producto de la fuerza con la que presionamos sobre el extremo multiplicado por su desplazamiento hacia abajo es igual al peso de la piedra multiplicado por su desplazamiento hacia arriba. El producto de la fuerza por el desplazamiento del punto a que se aplica es el *trabajo* efectuado por de acuerdo con la ley de la palanca de Arquímedes, *el trabajo por la mano que empuja hacia abajo el extremo largo de la barra de hierro es igual al trabajo efectuado por su*

extremo corto al elevar la piedra. Esta tesis puede ser generalizada a todo género de trabajo mecánico; por ejemplo, el trabajo realizado por los mozos de mudanzas subiendo un gran piano tres pisos es igual al trabajo de subir tres, grandes pianos tan sólo un piso[4].

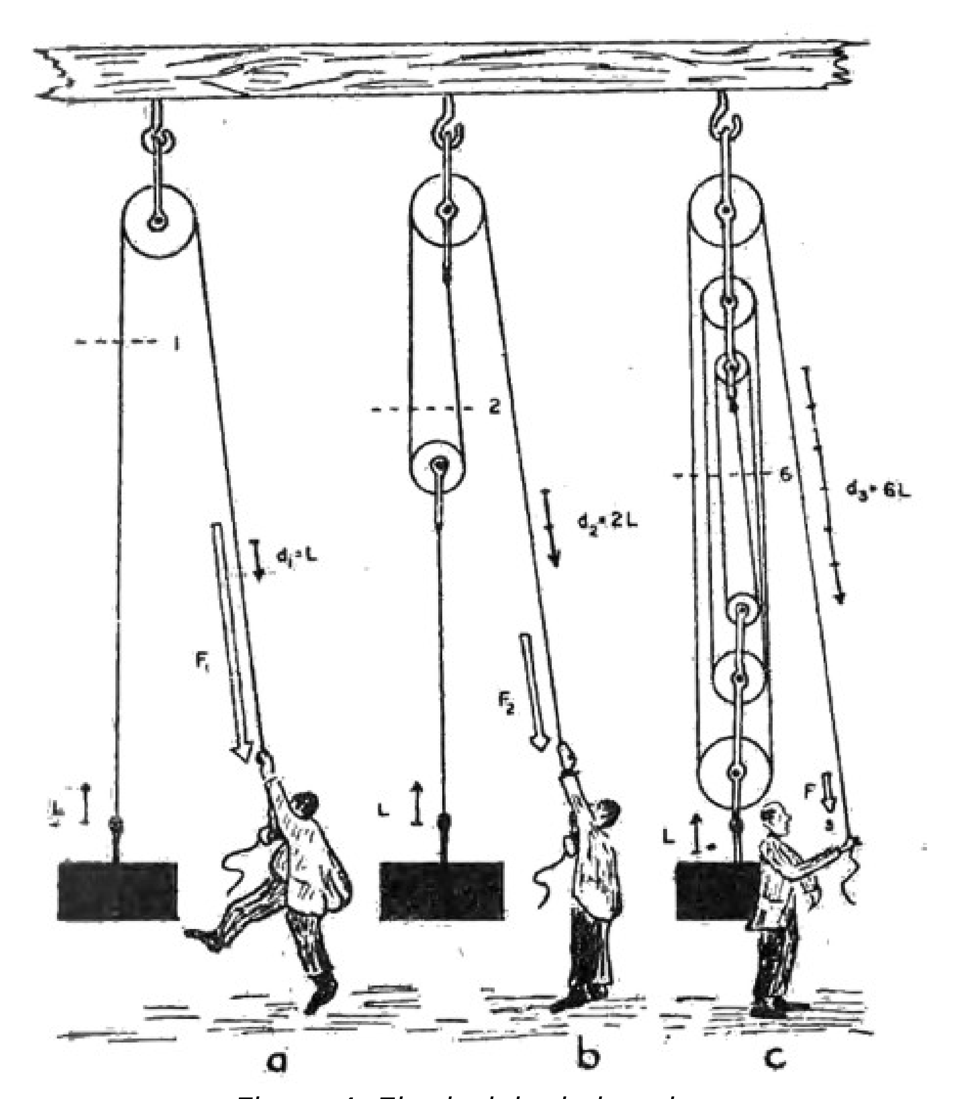


Figura 4. El principio de la polea.

El principio del trabajo igual, realizado por los dos brazos de palanca puede ser aplicado también a otro aparato análogo, la polea, empleada por Arquímedes para mover un pesado barco con gran sorpresa del rey Hierón Si para elevar un gran

[4] Los mozos de mudanzas profesionales pueden discutir esta afirmación arguyendo que en el caso de los tres grandes pianos tienen más trabajo en ajustar las cuerdas, etc., -pero únicamente nos referimos al trabajo relacionado con la elevación efectiva del objeto pesado.

peso, hacemos correr una cuerda atada a él a través de una rueda fija en una viga de madera (Figura 4 a), el peso será elevado la distancia (*l*) igual a la longitud (*d*), de la cuerda cobrada, y la fuerza (F_1) aplicada al extremo será igual al peso. Pero si disponemos dos ruedas en la forma indicada en la Figura 4 b, habremos cobrado dos veces la longitud de la cuerda y la fuerza que hemos de aplicar será tan solo la mitad del peso. En la disposición mostrada en la Figura 4c, la fuerza necesaria para elevar el peso será únicamente de un sexto mientras que el peso no será elevado más que un sexto de la longitud cobrada de la cuerda.

5. La ley de Arquímedes de los cuerpos flotantes

Probablemente el descubrimiento más conocido de Arquímedes es su ley sobre la pérdida de peso que sufren los cuerpos sumergidos en un líquido. La ocasión que le llevó a su descubrimiento ha sido descrita por Vitruvio con las siguientes palabras:

En el caso de Arquímedes, aunque hizo muchos maravillosos descubrimientos de todo género, sin embargo; de todos, el siguiente que vamos a relatar parece haber sido el resultado de una ilimitada ingeniosidad. Hierón, después de conquistar el poder real en Siracusa, resolvió como consecuencia de su feliz proeza colocar en cierto templo unta corona de oro que había prometido a los dioses inmortales. Contrató el trabajo a un precio fijo y pesó una exacta cantidad de oro que dio al contratista. Este, en la fecha .acordada, entregó con satisfacción del rey una pieza de orfebrería exquisitamente terminada y se vio que el peso de la corona correspondía exactamente al del oro entregado. Pero más adelante se formuló la acusación de que se había sustraído oro y se labia añadido un peso equivalente de plata en la manufactura de la corona. Hierón, ofendido por haber sido engañado, y no sabiendo cómo robar el robo, requirió a Arquímedes para que estudiara el asunto. Arquímedes, preocupado siempre por el caso, fue un día al baño y al meterse en la bañera observó que cuanto más se sumía su cuerpo tanta más agua rebosaba de la bañera. Como esto indicaba la manera de resolver el caso en cuestión, sin demorarse un momento y transportado de alegría, saltó fuera de la bañera y corrió por la casa desnudo, gritando a grandes voces que había encontrado lo que estala buscando: mientras gritaba repetidamente en griego: ¡eureka, eureka!

Considerando esto como el comienzo de su descubrimiento, se dice' que hizo dos masas del mismo peso que la corona, una de oro y la otra de plata. Después llenó una gran vasija hasta el mismo borde e introdujo la masa de plata. El agua que rebasó era igual en volumen al de la plata introducida en la vasija. Después, sacándola volvió a introducir la cantidad perdida de agua, empleando una medida de cuartillo hasta dejar el nivel del borde como había estado antes. Así encontró que el volumen de la plata correspondía a una determinada cantidad de agua.

Después de este experimento, hizo lo mismo introduciendo la masa de oro en la vasija llena y sacándola y midiendo como antes, vio que no se había perdido tanta agua, sino que una cantidad más pequeña; es decir, tanto menos necesitaba una masa de oro comparada con una masa de plata del mismo peso.

Por último, llenando la vasija e introduciendo la corona en la misma cantidad de agua encontró que rebasaba más agua que para la masa de oro del mismo peso. De aquí, razonando sobre el hecho que se había perdido más agua en el caso de la corona que en el de la masa oro, descubrió la mezcla de plata con el oro y patentizó el robo del contratista.

La prueba que dio Arquímedes de su ley en su libro *Sobre los cuerpos flotantes*, algo pesada aunque completamente correcta; la reproduciremos aquí, aunque en un idioma más moderno, considerando lo que ocurrirá si sumergimos una esfera de metal sólido en un cubo de agua. Supongamos que primero tomamos en vez de una esfera de hierro una esfera de plástico muy delgado del mismo diámetro, llena de agua. Como puede prescindirse del peso de la envoltura de plástico, la situación será la misma que si el agua de la bolsa fuera parte del agua del cubo y la balanza señalará cero. Sustituyamos ahora el agua de la bolsa con hierro que es siete veces más pesado que el mismo volumen de agua. Como una libra de agua fue soportada por el resto del agua del cubo con la balanza señalando cero, el cambio del agua por el hierro añadirá solamente 7 - 1 = 6 libras adicionales que es lo que señalará la balanza en este caso. Así, deducimos que la esfera de hierro que pesaba en el aire 7 libras, pierde 1 libra al ser sumergida; es decir, el peso del agua que desplaza. Esta es la ley de Arquímedes según la cual todo cuerpo sólido sumergido en un líquido pierde el peso del líquido desplazado por él.

6. Arquímedes, consejero militar

Además de ser un gran matemático y el fundador de la ciencia de la mecánica, Arquímedes sirvió también, dicho en términos modernos, como "consejero para la industria y las fuerzas armadas". La más conocida de sus invenciones de ingeniería es el llamado "*tornillo de Arquímedes*" (Figura 5), empleado para elevar agua. Este aparato, cuyo funcionamiento se comprende por sí solo, ha sido empleado ampliamente en los regadíos y para extraer de las minas el agua subterránea.

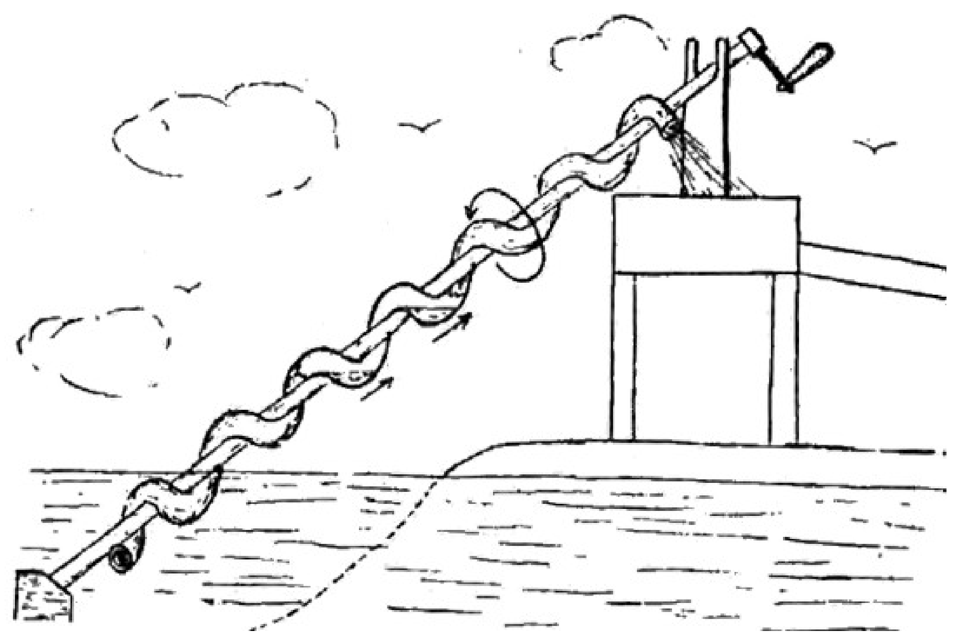


Figura 5. El tornillo de Arquímedes para elevar agua simplemente con hacerlo girar. Para comprender cómo trabaja, piénsese lo que ocurre en las partes bajas del tubo cuando gira y se verá que ascienden, no el tubo mismo, sino las posiciones del contenido "mínimo" de agua. Puede ayudar a la comprensión hacer una espiral con un alambre metálico y ver lo que ocurre cuando gira alrededor de su eje.

La participación de Arquímedes en los trabajos militares comenzó a lo que parece con su demostración de la polea al rey Hierón.

Según la dramática descripción de Plutarco en la *Vida de Marcelo*, al ver como Arquímedes movía el barco sin ningún esfuerzo, Hierón quedó pasmado y convencido del poder del arte, encargó a Arquímedes que le construyese toda especie de máquinas de sitio, bien fuese para defenderse o bien para atacar; de las cuales él no había hecho uso, habiendo pasado la mayor parte de su vida libre de

guerra y en la mayor comodidad, pero entonces tuvieron los siracusanos prontos para aquel menester las máquinas y el artífice.

Al acometer, pues, los romanos por dos partes, fue grande el sobresalto de los siracusanos y su inmovilidad a causa del miedo, creyendo que nada había que oponer a tal ímpetu y a tantas fuerzas, pero poniendo en juego Arquímedes sus máquinas se enfrentó a un mismo tiempo al ejército y a la armada de aquéllos. Al ejército, con armas arrojadizas de todo género y con piedras de una mole inmensa, despedidas con increíble violencia y celeridad, las cuales, no habiendo nada que resistiera a su peso, obligaban a muchos a la fuga y rompían la formación. En cuanto a las naves, a unas las asían por medio de grandes maderos con punta que repetidamente aparecieron en el aire saliendo desde la muralla y alzándose en alto con unos contrapesos, las hacían luego sumirse en el mar, y a otras, levantándolas rectas por la proa con garfios de hierro semejantes al pico de las grullas, las hacían caer en el agua por la popa o atrayéndolas y arrastrándolas con máquinas que calaban adentro, las estrellaban en las rocas y escollos que abundaban bajo la muralla, con gran ruina de la tripulación. A veces hubo naves que eran suspendidas en alto dentro del mismo mar y arrojadas en él y vuelta a levantar, fue un espectáculo terrible, hasta que, estrellados o expelidos los marineros, vino a caer vacía sobre los muros o se deslizó por soltarse del garfio que la asía. La máquina que Marcelo traía sobre el puente llamábase "*sambuca*", por la semejanza de su forma con aquel instrumento músico. Cuando todavía estaba bien lejos de la muralla, se lanzó contra ella una piedra de peso de diez talentos y luego segunda y tercera, de las cuales algunas, cayendo sobre la misma máquina con gran estruendo y conmoción, destruyeron el peso, rompieron su enlace y destruyeron el puente; con lo que, confundido y dudoso Marcelo, se retiró a toda prisa con las naves y dio orden para que también se retirasen las tropas. Tuvieron consejo y les pareció probar si podrían aproximarse a los muros por la noche, porque siendo de gran fuerza las máquinas que usaba Arquímedes no podían menos de hacer largos sus tiros, y puestos ellos allí serían del todo vanas por no tener la proyección bastante espacio. Mas a lo que parece, aquél se había prevenido de antemano con instrumentos que tenían movimientos proporcionados a toda distancia, con dardos

cortos y no largas lanzas, teniendo además prontos escorpiones que, por muchas y espesas troneras, pudiesen herir de cerca sin ser vistos de los enemigos.

Acercáronse, pues, pensando no ser vistos, pero al punto dieron otra vez con los dardos y eran heridos con piedras que les caían sobre la cabeza perpendicularmente; y como del muro también tirasen por todas partes contra ellos, hubieron de retroceder; y aun cuando estaban a distancia, llovían los dardos y les alcanzaban en la retirada, causándoles gran perdida y un continuo choque de las naves unas contra otras, sin que en nada pudiesen ofender a los enemigos porque Arquímedes había puesto la mayor parte de sus máquinas al abrigo de la muralla. Parecía, por tanto, que los romanos hacían la guerra a los dioses, según repentinamente habían venido sobre ellos millares de plagas.

Marcelo pudo retirarse y motejando a sus técnicos y fabricantes de máquinas: "¿No cesaremos —les decía— de guerrear contra ese geómetra Briareo, que usando nuestras naves como copas, las ha arrojado y todavía se aventaja a los fabulosos centimanos, lanzando contra nosotros tal copia de dardos?”. Y, en realidad, todos los siracusanos venían a ser como el cuerpo de las máquinas de Arquímedes y una sola alma la que todo lo agitaba y ponía en movimiento, no empleándose para nada las demás armas y haciendo la ciudad uso de solas aquéllas para ofender y defenderse.

Por fin, echando de ver Marcelo que los romanos habían cobrado tal horror, que lo mismo era ponerse mano sobre la muralla con una cuerda o en un madero, empezaban a gritar que Arquímedes ponía en juego una máquina contra ellos y volvían en fuga la espalda, tuvo que cesar en toda invasión y ataque, remitiendo sólo al tiempo el término feliz del asedio[5].

Cuando después de dos años de sitio, en el año 212 antes de Cristo, Siracusa fue, por fin, capturada por las legiones romanas, un destacamento de soldados romanos irrumpió en la casa de Arquímedes que estaba absorto en el patio trasero tratando algunas complicadas figuras geométricas en la arena.

Noli tangere circulos meos (No toquéis mis círculos), exclamó Arquímedes en su mal latín cuando uno de los soldados, pisó sobre ellos. En respuesta, el soldado traspasó con su lanza el cuerpo del anciano filósofo.

---

[5] Los anteriores párrafos han sido tomados de la traducción ya clásica de las Vidas Paralelas de Plutarco, de don Antonio Ray Romanillos. (N. del T.).

Cuando Cicerón fue cuestor, al visitar a Sicilia en 137 antes de Cristo, encontró la tumba de Arquímedes, cerca de la puerta Agrigentina, cubierta de abrojos y zarzales. "*Así* —escribió Cicerón— *esta ciudad, la más famosa y más culta de Grecia, habría ignorado la tumba de su ciudadano más ingenioso si no la hubiera descubierto un hombre de Arpinum.*''

7. La escuela alejandrina

Con la decadencia del poder político y económico de Atenas, el centro de la cultura griega se trasladó a Alejandría, fundada en el año 332 antes de Cristo, en la costa egipcia del Mediterráneo por Alejandro Magno como puerto clave para el comercio entre Europa y el Oriente. Por entonces Alejandría había llegado a ser una hermosa ciudad con "*4.000 palacios, 4.000 baños, 12.000 jardineros, 40.000 judíos que pagan tributo y 400 teatros y otros lugares de esparcimiento*". También se enorgullecía con una Universidad importante y una gran biblioteca que, desgraciadamente, fue destruida después por las llamas como resultado de un incendio general de la ciudad producido por la orden de Julio César de quemar la flota egipcia en el puerto. En Alejandría escribió Euclides sus *Elementos de Geometría*, y Arquímedes adquirió su conocimiento de las ciencias cuando llegó allí como un joven estudiante de Siracusa.

En el campo de la astronomía, Alejandría estuvo representada por Hiparco, que vivió a mediados del siglo II antes de Cristo. Hiparco llevó a la mayor precisión posible en aquel tiempo la observación de la posición de las estrellas y formó un catálogo de 1.080 estrellas que todavía se emplea por los astrónomos modernos como la fuente de referencia para los datos antiguos sobre las posiciones estelares. También descubrió el fenómeno de la precesión de los equinoccios, que son los puntos de la esfera celeste en que el Sol atraviesa el Ecuador celeste en su movimiento anual entre las estrellas. Este fenómeno es debido al hecho de que el eje de rotación de la tierra, al estar inclinado respecto al plano de su órbita, describe un cono en el espacio en torno de la línea perpendicular a la órbita en un período de 26.000 años. La causa de este movimiento fue descubierta casi dos mil años después por Sir Isaac Newton.

En cuanto a la física, la Escuela alejandrina está representada por Herón (o Hero), que fue más bien un ingeniero inventor que un físico. Su libro *Mecánica* contiene muchas afirmaciones exactas, pero también muchos errores matemáticos.

A pesar de sus defectos en el tratamiento matemático de los problemas fundamentales, el libro de Herón sobre mecánica contiene la descripción de un gran número de aparatos tales como poleas compuestas, varios tipos de engranajes y mecanismos de ruedas dentadas, etc. En su libro sobre "*pneumática*" expone el principio del sifón y un aparato de chorro de vapor, semejante a un corriente aspersor para prados, que, sin embargo, puede ser considerado como el precursor de los modernos motores de propulsión a chorro.

Herón escribió también un libro titulado *Catóptric*a, que contiene la teoría de los espejos y sus aplicaciones prácticas. Leemos en él:

> *La catóptrica es patentemente una ciencia digna de estudio y al mismo tiempo produce espectáculos que despiertan la admiración del observador. Porque con la ayuda de esta ciencia se construyen espejos que muestran el lado derecho al lado derecho y de modo análogo el lado izquierdo, mientras que los espejos corrientes tienen por su naturaleza la propiedad contraria y muestran los lados opuestos.*

Esto se consigue colocando dos espejos sin marcos, borde contra borde, y en ángulo recto uno con otro.

Es posible con la ayuda de espejos ver las propias espaldas. (A la manera como el peluquero muestra al cliente el corte de pelo en la parte posterior del cuello) y verse invertido, sostenido sobre la cabeza, con tres ojos y dos narices, las facciones como deformadas por un intenso pesar. (Como en los espejos de un parque de diversiones.)

Quién no considera útil que podamos observar alguna vez, mientras estamos dentro de nuestra casa, las personas que están en la calle y lo que están haciendo?

Las ideas de Hierón sobre la naturaleza de la luz se evidencian en lo que sigue:

> *Precisamente todos los que han escrito de dióptrica han estado en duda de por qué los rayos procedentes de nuestros ojos son reflejados por los espejos y por qué las reflexiones son en ángulos iguales. Ahora bien, la proposición*

de que nuestra vista se dirige en líneas rectas procedentes del órgano de visión, puede ser demostrada como sigue. Cualquier cosa que se mueve sin cambiar de velocidad se mueve en línea recta. Las flechas que disparamos con arcos pueden servir de ejemplo. Porque, a causa de la fuerza impulsora, el objeto en movimiento tiende a moverse siguiendo la distancia más corta posible, porque no tiene tiempo a un movimiento más lento, esto es, para moverse sobre una trayectoria más larga. La fuerza impulsora no permite esa retardación. Y así, por razón de su velocidad, el objeto tiende a moverse por el camino más corto. Pero la más corta de todas las líneas que tienen el mismo punto final es la línea recta. Que los rayos procedentes de nuestros ojos se mueven con velocidad infinita puede inferirse de la siguiente consideración. Cuando después de haber cerrado los ojos los abrimos y miramos al cielo no se necesita ningún intervalo de tiempo para que los rayos visuales alcancen el cielo. En efecto, vemos las estrellas tan pronto como las miramos, aunque podemos decir que la distancia es infinita. Además, si la distancia fuera mayor, el resultado sería el mismo, de suerte que es patente que los rayos son emitidos con velocidad infinita. Por tanto, no sufrirán ni interrupción ni curvatura, pero se moverán a lo largo del camino más corto, una línea recta.

Este pasaje revela el hecho curioso de que Herón y a lo que parece todos sus contemporáneos creían que la visión es debida a algunos rayos emitidos por los ojos y reflejados por el objeto, lo que es el mismo principio del radar actual.

Otro gran alejandrino fue el astrónomo Claudio Ptolomeo (no confundirle con los miembros de la dinastía ptolemaica que reinó en Egipto muchos años antes de la era cristiana), que vivió y trabajó durante la primera mitad del siglo II después de Cristo. Las observaciones de Ptolomeo sobre las estrellas y planetas, reunidos en su libro conocido como el *Almagesto*, representan un importante añadido a los datos obtenidos por Hiparco dos siglos y medio antes. Su contribución importante a la física está contenida en su libro *Óptica*, que nos ha llegado en una traducción latina de la última versión árabe del manuscrito griego original. En este libro, Ptolomeo

discute entre otros casos la importante cuestión de la refracción de la luz al pasar de un medio a otro. Escribe:

> *Los rayos visuales pueden ser alterados de dos maneras: por reflexión, es decir, rechazados por objetos, llamados espejos, que no permiten la penetración, y por curvatura (es decir, refracción) en el caso de medios que permiten la penetración y tienen una designación común ("materias trasparentes") por la razón de que el rayo visual penetra en ellos.*

Explica el fenómeno de refracción por el sencillo experimento siguiente, mediante una moneda colocada en el fondo de una vasija llena de agua Ramada un "baptistir"[6] (Figura 6 a).

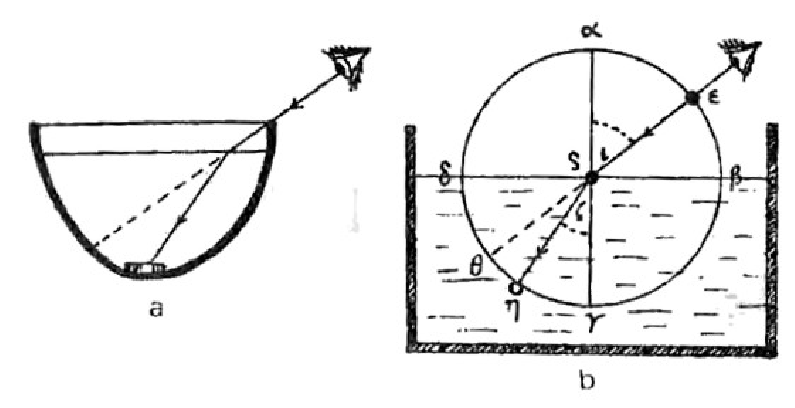


Figura 6. Experimentos de Ptolomeo sobre la refracción de la luz: a) La moneda en el fondo de una vasija llena de agua parece estar más alta que lo que está en realidad. b) El aparato para estudiar la refracción de la luz. Ptolomeo medía la relación entre el ángulo $\delta\zeta\eta$ en el agua y el ángulo $\alpha\zeta\varepsilon$ en el aire y establecía la dependencia entre ellos.

Supongamos que la posición del ojo es tal que el rayo visual que procede de él, pasando sobre el borde del baptistir, alcance un punto más alto que la moneda. Entonces, sin que se altere la posición de la moneda, echamos agua lentamente en el baptistir hasta que el rayo que pasa exactamente por el borde se curve hacia abajo y caiga sobre la moneda. El resultado es que el objeto que antes no se veía se ve entonces en la línea recta que va desde el ojo al punto sobre la verdadera posición del objeto. Ahora bien, el observador no supondrá que el rayo visual se ha

[6] Probablemente empleado en las iglesias para bautizar.

curvado hacia el objeto sino que el objeto mismo está flotante y se ha levantado hacia el rayo. Por tanto el objeto aparecerá en la perpendicular trazada desde el ala superficie del agua.

Más tarde, en el texto, Ptolomeo describe un experimento encaminado a estudiar en detalle las leyes de la refracción de la luz.

El grado de refracción que se produce en el agua y que puede ser observado se determina por un experimento como el que hemos realizado con la ayuda de un disco de cobre al examinar las leyes de los espejos. En este disco se trata un círculo $\alpha\beta\gamma\delta$ (fig. 6 b) con el centro en σ y los diámetros $\alpha\sigma\gamma$ y $\delta\sigma\beta$ que se cortan en ángulo recto. Dividimos cada cuadrante en noventa partes iguales y colocamos sobre el centro una marca roja muy pequeña. Entonces ponemos este disco vertical en una pequeña vasija y echamos en esta agua clara en cantidad moderada de modo que la visión no quede obstruida. Pongamos la superficie del disco, quedando perpendicular a la superficie del agua, de modo que sea dividido por el agua en dos partes iguales quedando medio círculo —y sólo medio círculo, que es $\beta\gamma\delta$— enteramente bajo el agua. Tracemos el diámetro $\alpha\sigma\gamma$ perpendicular a la superficie del agua.

Tomemos ahora un arco medido, por ejemplo $\alpha\varepsilon$, desde el punto α en uno de los dos cuadrantes del disco que están sobre el nivel del agua. Coloquemos en ε una pequeña marca de color. Con un ojo miremos a las marcas en ε y en σ, ambas aparecerán en una línea recta a partir del ojo. Al mismo tiempo, movamos una pequeña y delgada regla a lo largo del arco $\gamma\delta$ del cuadrante opuesto, que está debajo del agua, hasta que la extremidad de la regla aparezca en el punto de la prolongación de la línea que une ε y σ. Ahora, si medimos el arco entre el punto γ y el punto η en el cual la regla aparece en la línea antes dicha encontraremos que este arco, $\gamma\eta$, siempre es más pequeño que el arco $\alpha\varepsilon$.

Si miramos a lo largo de la perpendicular $\alpha\sigma$, el rayo visual no se curvará, sino que caerá sobre y opuesto a α y en la misma línea recta que $\alpha\sigma$. Sin embargo, en todas las demás posiciones, cuando el arco $\alpha\varepsilon$ aumenta, también aumenta el arco $\gamma\eta$ pero el grado de curvatura del rayo será progresivamente mayor.

			Curvatura
Cuando $\alpha\varepsilon$ es 10°	$\gamma\eta$ será	8°	2°
20°		15 ½°	4 ½°
30°		22 ½°	7 ½°
40°		29°	11°
50°		35°	15°
60°		40 ½°	19 ½°
70°		45 ½°	24 ½°
80°		50°	30°

Este es el método por el cual hemos descubierto el grado de refracción en el caso del agua.

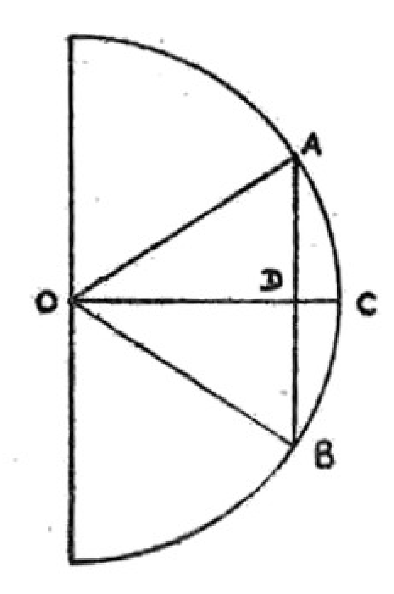


Figura 7. La relación entre las tablas de las cuerdas de Plutarco y las modernas tablas trigonométricas. Plutarco establecía las longitudes de las cuerdas ADB para las diversas longitudes de los arcos ACB. En la trigonometría moderna se establece la relación de la longitud AD (media cuerda) respecto al arco AC. La longitud AD se llama seno y la longitud OD coseno de este ángulo.

Asimismo Ptolomeo estudió por un método similar la refracción de la luz en el límite entre el agua y el cristal y encontró que en este caso la curvatura del rayo es

mayor. No intentó, sin embargo (o si lo intentó no lo consiguió), expresar los resultados de sus observaciones por medio de una fórmula matemática; la formulación matemática de la ley de refracción de la luz no se encontró hasta el siglo XVII. Es bastante irónico que pudo haberlo hecho fácilmente porque el aparato matemático implicado en la formulación de esta ley era la relación entre arcos y cuerdas expuestas por Plutarco siglo y medio antes y desarrollada por él mismo con gran extensión en el *Almagesto* en relación con las observaciones astronómicas.
El problema era encontrar la relación de la cuerda ADB correspondiente al arco ACB del círculo de radio unidad (Figura 7).
Empleando ingeniosos métodos matemáticos, Ptolomeo construyó una tabla, de la cual reproducimos una parte:

Arcos	**Cuerdas**	**Arcos**	**Cuerdas**	**Arcos**	**Cuerdas**
116°	1,014557	117 ½°	1,023522	119°	1,032344
116 ½°	1,020233	118°	1,025137	119 ½°	1,033937
117°	1,021901	118 ½°	1,030741	120°	1,035520

Esta tabla corresponde a lo que ahora conocemos como tablas trigonométricas de los senos, con la única diferencia que sólo se usan medios arcos (el ángulo AOC) y medias cuerdas AD. La longitud AD, cuando el radio es la unidad, se la conoce como seno de AOC, mientras la distancia OD es coseno de AOC. Las funciones trigonométricas son sumamente útiles para resolver diversos problemas geométricos que implicaran longitudes y ángulos.
Si Ptolomeo hubiera comparado los resultados de su experimento sobre la refracción de la luz con su tabla de senos, hubiera visto que la razón del seno del ángulo de incidencia con el seno del ángulo de refracción es una constante para cada par de sustancias. No lo hizo, y esta ley de la refracción no fue descubierta hasta catorce siglos más tarde por el matemático y astrónomo inglés Willebrord Snell. Como veremos más adelante, la ley de Snell es de extraordinaria importancia para la comprensión de la naturaleza de la luz.
La obra de Ptolomeo ha sido la última gran contribución de la antigua cultura griega al desarrollo de la ciencia y después de su muerte comenzó a decaer rápidamente la

investigación en Alejandría. Probablemente, el último nombre que puede ser mencionado en relación con la escuela de Alejandría es el de Hypatia, hija del matemático Theon, y, por su parte, profesora de ciencia y filosofía. Vivió en el reinado del emperador romano Julián el Apóstata, que trató de proteger la sabiduría griega y los dioses griegos contra el poder cada vez mayor de la Iglesia cristiana. La reacción que se produjo después de su muerte tuvo por resultado, en el año 415 de nuestra Era, una gran revuelta antigriega organizada por el obispo Kirilos de Alejandría. Hypatia fue despedazada por las masas cristianas y los restos de la biblioteca de la ciudad fueron destruidos.

Capítulo 2
Las edades oscuras y el renacimiento

Al extinguirse la cultura griega quedó virtualmente detenido el desarrollo de la ciencia en general y de la física en particular. Los romanos, que dominaban el mundo durante este período de la historia humana, se cuidaban muy poco del pensamiento abstracto. Eran una "civilización de hombres de negocios" y aunque estimulaban el saber, se interesaban mucho más por las aplicaciones prácticas. Después de la caída del Imperio romano la situación fue de mal en peor, y los Estados feudales que se formaron sobre sus ruinas no representaban ciertamente un suelo fértil para ningún género de desarrollo científico. El único estímulo unificante durante este período, que se extendió por más de mil años, fue la religión cristiana, y las abadías y monasterios se tornaron centros intelectuales. En consecuencia, el principal interés se concentró en torno a los problemas teológicos y todo lo que quedaba después de la caída de la antigua cultura griega fue sometido a la dictadura religiosa. El sistema ptolomeico del mundo, con la Tierra en el centro y el Sol y los planetas y estrellas girando a su alrededor, fue aceptado como un dogma inconmovible porque se adaptaba mejor al concepto de la posición central del Vaticano como la residencia del emisario escogido por Dios en la Tierra. Las discusiones "científicas" se limitaban principalmente a problemas tales como cuántos ángeles podían danzar en la punta de una aguja y si el Dios omnipotente podía hacer una piedra tan pesada que Él no pudiera elevarla hasta Él mismo. En toda Europa floreció un "Lysenkoísmo" primitivo, y la Santa Inquisición cuidó de aplastar cualquier desviación de la línea general de la creencia religiosa.

Afortunadamente para nosotros, la ciencia griega encontró un refugio en el recién nacido Imperio árabe que, en el transcurso del siglo VII, engolfó todas las tierras al sur del Mediterráneo y pasó a España a través del angosto estrecho de Gibraltar. El benevolente potentado Haroun Al-Raschid, de la historia de "*Las mil y Una Noches*" fundó en el año 800 una escuela de ciencias en Bagdad, mientras la ciudad de Córdoba en España se convertía en un centro cultural del Imperio árabe en suelo europeo. Los eruditos árabes estudiaron y tradujeron manuscritos griegos salvados de las bibliotecas helénicas parcialmente destruidas, y sostuvieron la bandera de la

ciencia mientras Europa se asfixiaba en las garras del escolasticismo medieval. La era arábiga en la historia queda atestiguada por términos científicos todavía en uso actualmente, como algebra, alcohol, álcali, amalgama, almanaque, antares, etc. Los árabes realizaron considerables progresos en matemáticas, desarrollando el álgebra, desconocida de los griegos, e introdujeron los numerales arábigos que hacen mucho más fácil el cálculo que con el sistema romano. Pero acaso, como resultado de los cuentos de hadas de Sherezada, su obra en astronomía y química se limitó casi por completo a la persecución de objetivos fantásticos para predecir la vida del hombre sobre la base de la configuración de las estrellas bajo las cuales había nacido (astrología) y encontrar los métodos de convertir los metales comunes en oro (alquimia). No parece que hayan hecho nada en el campo de la física, excepto, naturalmente, el que la alquimia puede ser considerada como una precursora de las técnicas modernas para transmutar un elemento químico en otro. Pero "*cuando el moro acabó su tarea, el moro tuvo que irse*" y en el siglo XII el Imperio árabe sucumbió rápidamente como resultado de la invasión de Genghis Khan y las repetidas Cruzadas cristianas a Tierra Santa.

Por este tiempo, los Estados europeos estaban emergiendo lentamente del caos de la oscura Edad Media y el saber volvió a elevarse. En el año 748, Carlomagno, el soberano del Imperio franco, decretó que todas las abadías en sus vastos dominios debían tener escudas agregadas; y en 1100 fue fundada la Universidad de Paris. Poco después se fundaron las Universidades de Bolonia, Oxford y Cambridge y rápidamente se tornaron en famosos centros de actividad escolar. El cuso corriente de estudios consistía en el "*trivium*", que incluía gramática latina, retórica y lógica, y el "*quadrivium*", que incluía aritmética, geometría, música y astronomía. Sin embargo, la educación continuaba todavía bajo la vigilante supervisión de la Iglesia, y las Universidades en todos los países cristianos tenían que obtener la sanción del Papa para continuar su existencia. Los estudios estaban basados casi por completo en las obras de Aristóteles, que llegaban a Europa en versión árabe. Como hemos dicho antes, el hecho de que Aristóteles, aunque eminente en otros muchos respectos, no fuera lo mismo en el campo de las ciencias físicas no ayudó ciertamente nada al rejuvenecimiento de la física en Europa, que estaba comenzado a despertar de su sueño de mil años.

Uno de los factores importantes en la difusión de los conocimientos fue la invención de la imprenta a mediados del siglo XV en el taller de un hombre llamado Fust, en Mainz, Alemania, y uno de los libros más importantes que salieron de estas primeras prensas fue, sin duda, *De Revolutionibus Orbitum Coelestium* (Nuremberg, año 1543) de Nicolás Copérnico en el cual estableció un nuevo sistema del mundo con el Sol en su centro. Pero, para evitar su prohibición por la Iglesia, pareció necesario añadir a este libro un prefacio (escrito probablemente sin conocimiento de Copérnico por su editor Andreas Osiander) que declaraba que todas las ideas expresadas en el eran de carácter puramente hipotético y representaban más bien un ejercicio matemático que una descripción de las cosas reales.

1. Elocuencia y leyes de Kepler

La mezcla de teología y verdadera ciencia durante esta época se ilustra de la mejor manera por los siguientes pasajes de *Mysterium Cosmographirum* (1596) de Johannes Kepler, descubridor de las leyes fundamentales de los movimientos planetarios. Dedicado a un grupo de nobles alemanes que ayudaban a Kepler en sus investigaciones, el libro comienza con las siguientes palabras:

> *A sus ilustres, Nobles y Virtuosos señores, Sigismund Friedrich, barón de Herberstein..., a los Más Nobles Señores de los Ilustres Estados de Styria, el Honorable consejo de los Cinco, mis gentiles y amables Señores,*
>
> *Saludos y Humildes Respetos.*
>
> *Como he prometido hace seis meses escribir una obra que a juicio de los entendidos fuera elegante, notable y muy superior a los calendarios anuales, presento ahora a vuestra amable compañía, mis Nobles Señores, una obra que, aunque pequeña en extensión, si bien fruto de mis propios y modestos esfuerzos, sin embargo trata de un maravilloso tema. Si deseáis antigüedad —Pitágoras ya lo ha tratado hace unos dos mil años. Si queréis novedad —es la primera vez que esta cuestión ha sido presentada a toda la humanidad por mí mismo. Si deseáis grandeza —nada mayor, o más dilatado que el Universo. Si deseáis venerabilidad —nada es más precioso, nada más bello que nuestro magnificente templo de Dios. Si deseáis conocer los misterios —nada hay o ha habido en la Naturaleza más recóndito. Hay, sin embargo, una*

razón por la que mi tema no satisfará a todo el mundo porque su utilidad no sera evidente a los irreflexivos. Me estoy refiriendo al Libro de la Naturaleza, que es tan estimado como las Sagradas Escrituras. San Pablo exhortaba a los gentiles a reflejar a Dios dentro de sí mismos como reflejaban al Sol en el agua o en un espejo. Por qué entonces los cristianos deleitarnos menos en su reflexión, viendo que nuestra verdadera tarea es honrar, reverenciar y admirar a Dios por el verdadero Camino Nuestra devoción en esto es tanto más profunda cuanto mayor es nuestro conocimiento de la creación y su grandeza. Verdaderamente, ¡cuántos himnos de alabanza entonó David, Su fiel servidor, cantando al Creador que no es otro que Dios! En esto su alma se vertió reverentemente en la contemplación del Cielo. El Cielo, canta, declara la gloria de Dios. Yo contemplo Tus cielos, la obra de Tus manos, la Luna y las Estrellas que Tú has ordenado. Dios es nuestro Señor y grande es Su poder: Él ha contado la multitud de las Estrellas y las conoce por sus nombres. Dondequiera, inspirado por el Espíritu Santo y lleno de gozo exclama al Universo: Alabad al Señor, alabad a Él, al Sol y la Luna, etc.

Después leemos:

El hecho de que todo el mundo este circunscrito por una esfera ya ha sido discutido exhaustivamente por Aristóteles (en su libro sobre los Cielos), que fundaba su prueba especialmente en la significación especial de la superficie esférica. Por esta razón, aun hoy la esfera más exterior de las estrellas fijas ha mantenido su forma aun cuando no se le puede atribuir ningún movimiento. Ella tiene al Sol como su centro en su seno más interior. El hecho de que las restantes órbitas sean redondas puede ser visto por el movimiento circular de las estrellas. Así, pues, no necesitamos otra prueba de que la curva fue empleada para adornar el mundo. Mientras, no obstante, tenemos tres clases de cantidad en el mundo, a saber: forma, número y contenido de los cuerpos, lo curvado está fundado solamente en la forma. En esta, el contenido no es importante, puesto que una estructura se inscribe concéntricamente en otra semejante (por ejemplo, la esfera en la esfera, o el círculo en el círculo), ya tocándose en todas partes o en ninguna. Lo esférico,

en cuanto que representa una unidad absolutamente única, únicamente puede ser regido por el número Tres.

Mientras Keplero escribía estos floridos pasajes trabajaba esforzadamente en un problema más prosaico: la ley exacta del movimiento planetario. El sistema copernicano, tal como aparece en *Revolutionibus*, suponía que las órbitas planetarias eran círculos, de acuerdo con la vieja tradición de la filosofía griega que consideraba el círculo como una curva perfecta y la esfera como un cuerpo perfecto. Pero esta hipótesis no se adaptaba a las medidas minuciosas de los movimientos planetarios realizadas por un astrónomo danés, Tycho Brahe, en su observatorio particular, sito en una pequeña isla no lejos de Copenhague. Como discípulo y ayudante de Tycho y en posesión de considerables conocimientos matemáticos adquiridos por la lectura de Euclides y otras obras clásicas griegas, Keplero se impuso la tarea de encontrar cuál es la forma exacta de las órbitas planetarias y cuáles son las leyes que gobiernan sus movimientos. Después de algunos años de trabajo llegó a su primer descubrimiento importante. Encontró que en su movimiento alrededor del Sol los planetas no siguen exactamente órbitas circulares sino que describen otra clase de curvas tan famosas como el círculo en la geometría euclidiana. Estas curvas son conocidas con el nombre de secciones cónicas y pueden ser definidas como la intersección de un cono con planos orientados diversamente. Si el plano es perpendicular al eje tendremos, naturalmente, un círculo en la sección transversal. Pero si el plano es inclinado respecto al eje del cono tendremos curvas alargadas conocidas como elipses. Cuando el plano es paralelo a un lado del cono, un extremo de la elipse desaparece en el infinito y tenemos una curva abierta conocida por el nombre de parábola. Con una inclinación aún mayor la curva resulta más "abierta" y se convierte en lo que se llama una hipérbola. Debemos decir que en el caso de la hipérbola tenemos de hecho dos ramas desconectadas, la segunda rama producida por la intersección del plano con la segunda parte invertida del cono. Una elipse puede ser definida también como una serie de puntos elegidos de tal modo que la suma de las distancias de cada uno de ellos a los dos puntos fijos llamados focos es siempre la misma. Así, pues, se puede trazar una elipse atando una cuerda a dos chinches en un cartón y moviendo el lápiz de tal manera que la

cuerda siempre este tirante. De modo análogo una hipérbola es una serie de puntos para los cuales la diferencia de distancias de los dos focos es constante (Figura 8 a) lo que no suministra ninguna conveniente manera práctica de trazar esta curva.

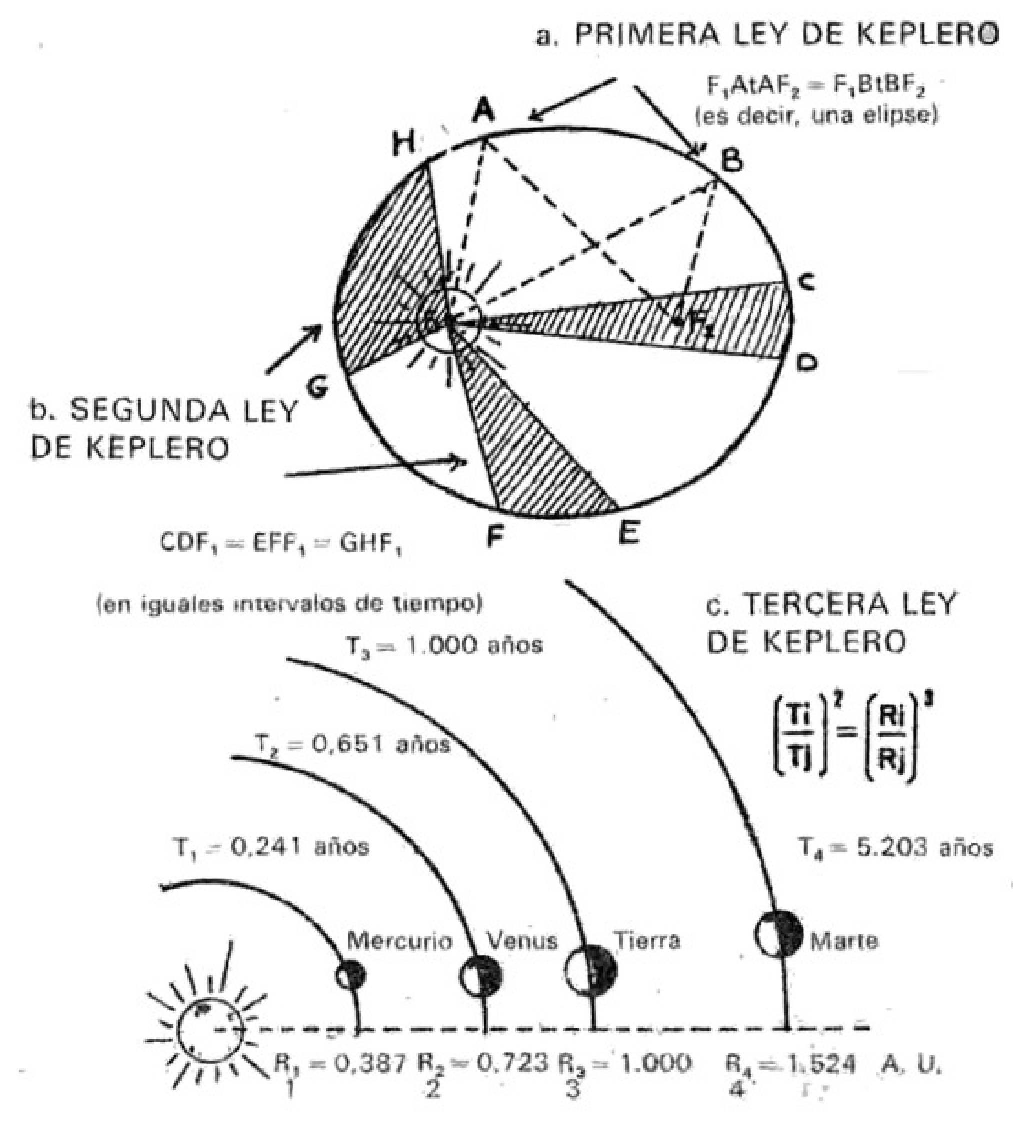


Figura 8. Las tres leyes de Keplero sobre el movimiento planetario.

Analizando los datos de Tycho Brahe relativos a las posiciones de los planetas entre las estrellas, Keplero llegó a la conclusión de que todas las cosas se ajustarían mejor si se supusiera que todos los planetas recorren órbitas elípticas teniendo al Sol situado en uno de sus focos. Descubrió también que en su movimiento alrededor del Sol los planetas se mueven más rápidamente cuando están cerca del Sol (en el afelio) y más lentamente cuando están más lejos (perihelio). La

correlación entre las velocidades de un planeta y sus distancias al Sol en las diferentes partes de su órbita es tal que la línea imaginaria que une el Sol y el planeta recorre iguales superficies de la órbita planetaria en intervalos iguales de tiempo (Figura 8 a). Estas dos leyes fundamentales del movimiento planetario fueron anunciadas por Keplero en 1609 y ahora se conocen como las leyes primera y segunda de Keplero.

Después de hallar las leyes del movimiento de cada planeta, Keplero comenzó a buscar la correlación entre los diferentes planetas y en esta labor empleó nueve años. Ensayó todas las clases de posibilidades tal, por ejemplo, como la correlación entre las órbitas planetarias y los poliedros regulares de la geometría del espacio, pero nada le pareció adecuado. Finalmente, vino un brillante descubrimiento que hoy se conoce como la tercera ley de Keplero, que dice: los cuadrados de los períodos de revolución de los diferentes planetas en torno al Sol están en la misma razón que los cubos de sus distancias medias al Sol. En la Figura 8 b damos un esquema de las órbitas de los planetas llamados interiores —Mercurio, Venus, Tierra y Marte— con sus distancias expresadas en términos de los radios de la órbita terrestre (la llamada Unidad Astronómica) y los períodos de su revolución en años.

Tomando los cuadrados de los períodos de revolución obtenemos la serie:

0'058 0'378 1'000 3'540

Por otra parte, tomando los cubos de las distancias tenemos:

0'058 0'378 1'000 3'540

La identidad de las dos series demuestra la exactitud de la tercera ley de Keplero.

Así pues, en el siglo XVII, los científicos supieron cómo los planetas se mueven alrededor del Sol, pero pasó medio siglo antes de que pudieran responder a la cuestión de por qué lo hacen así.

2. La cadena de Stevinus

Mientras Keplero se interesaba principalmente por las esferas celestes, un contemporáneo suyo, el ingeniero flamenco Simón Stevinus se interesaba más por cosas de tejas abajo y ampliaba los trabajos de Arquímedes sobre el equilibrio mecánico generalmente conocido como "*Estática*". Su principal contribución fue la solución al problema del equilibrio en un plano inclinado que no fue acometido por Arquímedes y, como hemos visto antes, fue tratado erróneamente por Herón. En la cubierta del libro de Stevinus sobre Estática aparecía un diagrama, el de la Fig. 9, que señala un gran progreso en la comprensión de los problemas del equilibrio. Una cadena formada por un cierto número de esferillas metálicas (bolas de cojinete, las llamaríamos hoy) se coloca en un soporte prismático con lados muy lisos (sin fricción). ¿Qué sucederá? Como hay más bolas en el lado izquierdo, que es el más largo del prisma, que en el derecho (el más corto), se podría pensar que, a causa de la diferencia de pesos, la cadena comenzaría a moverse de la derecha a la izquierda.

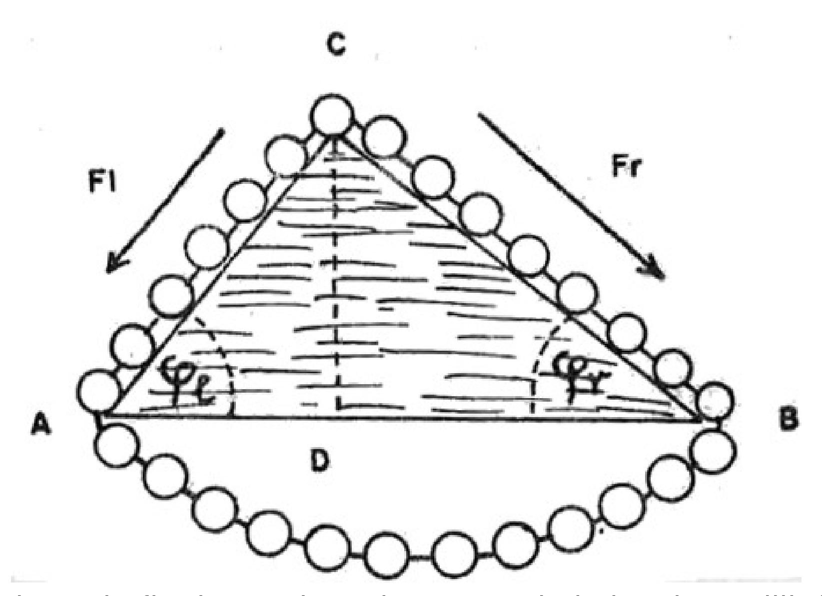


Figura 9. La cadena sin fin de Stevinus demostrando la ley de equilibrio en un plano inclinado.

Pero, como la cadena es continua, este movimiento nunca se detendría y la cadena giraría para siempre. Si esto fuera verdad, podríamos añadir a este aparato algunas ruedas dentadas y engranajes y hacer girar todo género de maquinaria por un período indefinido de tiempo, sin coste alguno. De este modo obtendríamos trabajo

realizado por nada y la humanidad obtendría más beneficios que con todas las promesas del programa "*átomos para la paz*".

Pero Stevinus, que era un hombre práctico y sensato, descartó esta posibilidad y postuló que la cadena debía quedar en equilibrio. Esto significa que el empuje de una bola colocada sobre un plano inclinado decrece con el ángulo entre éste y el plano horizontal, lo que está totalmente conforme con el hecho de que ninguna fuerza actúa sobre una bola colocada sobre una superficie horizontal. Como el número de bolas situadas en los lados derecho e izquierdo es evidentemente proporcional a la longitud de estos lados, se puede escribir, designando por F_l y F_r las fuerzas que actúan sobre cada bola en cada lado:

$$F_l \times AC = F_r \times CB$$

$$F_l / F_r = CB / AC$$

Introduciendo los senos de los ángulos φ_l y φ_r que caracterizan los dos lados, tenemos

$$\text{seno } \varphi_l = CD / AC; \text{ seno } \varphi_r = CC / CB$$

de suerte que la relación anterior pueda formularse de este modo:

$$F_l / F_r = \text{seno } \varphi_l / \text{seno } \varphi_r$$

Expresado en palabras significa que *la fuerza de gravedad que actúa sobre un objeto situado en un plano inclinado en la dirección de este plano es directamente proporcional al seno del ángulo de inclinación*.

3. El péndulo

Mientras Stevinus hizo considerables progresos en sus estudios de Estática, el honor de haber dado los primeros pasos en la ciencia de la Dinámica, esto es, el estudio del movimiento de los cuerpos materiales, pertenece al hijo de un noble florentino

empobrecido llamado Vicenzo Galilei. Aunque el Signor Vicenzo estaba muy interesado por las matemáticas, proyectó para su hijo menor, Galileo, la carrera de medicina como una profesión más provechosa. Así fue como en 1581, a la edad de 17 anos, Galileo comenzó los estudios de medicina en la Universidad de Pisa. Pero evidentemente no veía en la disección de los cuerpos muertos una ocupación realmente excitante y su espíritu inquieto se preocupó por otra clase de problemas.

Un día que oía misa en la catedral de Pisa, se quedó abstraído observando una lámpara que se había puesto en movimiento por el sirviente que había encendido las velas. Las sucesivas oscilaciones iban siendo cada vez más cortas conforme la lámpara iba llegando lentamente al reposo. *"¿Es que el tiempo de cada oscilación va siendo también más corto?"*, se preguntó Galileo. Como no tenía reloj —no había sido inventado todavía— Galileo decidió medir el tiempo de las sucesivas oscilaciones por medio de su propio pulso. Y probablemente con gran sorpresa descubrió que, aunque las oscilaciones eran cada vez más cortas, el tiempo de su duración era exactamente el mismo. Al volver a su casa repitió el experimento con una piedra atada al final de una cuerda y encontró el mismo resultado. Asimismo descubrió que, para una longitud dada de la cuerda, el período de oscilación era el mismo, usase una piedra pesada o una piedra ligera en el experimento. De este modo, el aparato familiar conocido como un péndulo vino a la existencia. Teniendo todavía un pie en la profesión médica, Galileo invirtió el procedimiento de su descubrimiento y sugirió el uso de un péndulo de una longitud dada para medir los latidos del pulso de los pacientes. Este aparato, conocido por el "*pulsómetro*", se hizo muy popular en la medicina contemporánea y fue el precursor de la moderna enfermera, vestida de blanco, que sostiene la mano del paciente, mirando a su elegante reloj de pulsera. Pero esta fue la última colaboración de Galileo a la ciencia médica, porque el estudio del péndulo y otros aparatos cambiaron por completo la orientación de su interés.

Durante una serie de años, su interés se concentró en el campo de lo que ahora conocemos como Dinámica, esto es, el estudio de las leyes del movimiento. ¿Por qué el período del péndulo es independiente de la "*amplitud*", es decir, de la medida de la cuerda? ¿Por qué una piedra ligera y una piedra pesada al fin de la misma cuerda oscilan con el mismo período? Galileo nunca resolvió el primer problema

porque su solución requería el conocimiento del cálculo que fue inventado por Newton casi cien años después. Nunca resolvió tampoco el segundo problema que había de esperar por los trabajos de Einstein sobre la teoría general de la relatividad. Pero contribuyó en gran medida a la formulación de ambos, si no a su solución. El movimiento de un péndulo es un caso especial de la caída originada por la fuerza de la gravedad. Si soltamos una piedra, que no está atada a nada, caerá en línea recta al suelo. Pero si la piedra está atada a un gancho en el techo se ve forzada a caer a lo largo de un arco de círculo. Si una piedra ligera y otra pesada, atadas a una cuerda, emplean el mismo tiempo en alcanzar la posición más baja (un cuarto del período de oscilación), entonces ambas piedras deben emplear el mismo tiempo en caer al suelo cuando se las suelta de la misma altura. Esta conclusión estaba en contradicción con la opinión aceptada generalmente de la filosofía aristotélica en aquel tiempo, según la cual los cuerpos pesados caían más rápidamente que los ligeros. Para comprobarlo, Galileo dejó caer desde la torre inclinada de Pisa dos esferas, una de madera y otra de hierro, y los incrédulos espectadores situados abajo observaron que las dos esferas chocaban con el suelo al mismo tiempo. La investigación histórica parece indicar que esta demostración nunca se realizó y representa solamente una leyenda pintoresca. Tampoco es cierto que Galileo descubriera la ley del péndulo mientras estaba rezando en la catedral de Pisa. Pero es cierto que arrojaba objetos de diferente peso, acaso desde el tejado de su casa, y que hacía oscilar piedras atadas a una cuerda, acaso en el patio trasero.

4. Las leyes de la caída

Cuando se suelta una piedra esta cae cada vez más rápidamente y Galileo quería conocer las leyes matemáticas que rigen este movimiento acelerado. Pero la libre caída de los cuerpos se realiza demasiado rápidamente para estudiarla en detalle sin el empleo de aparatos modernos, tales, por ejemplo, como la fotografía instantánea. Por esta razón, Galileo decidió "*diluir la fuerza de gravedad*" haciendo que la esfera rodase por un plano inclinado. Cuanto más inclinado el plano, más rápidamente rueda la esfera y en el caso limite de un plano vertical la esfera cae libremente a lo largo del plano. La dificultad principal para realizar el experimento era la medida del tiempo empleado por la esfera para recorrer distancias diferentes.

Galileo la resolvió mediante el reloj de agua, en el cual se mide el tiempo por la cantidad de agua que pasa a través de una pequeña abertura en el fondo de una gran vasija. Marcando las posiciones de la esfera en iguales intervalos de tiempo, a partir del origen, halló que las distancias recorridas durante estos intervalos de tiempo estaban en la proporción 1 : 3 : 5 : 7, etc. Cuando el plano estaba más inclinado, las correspondientes distancias eran más largas, pero sus relaciones eran siempre las mismas. Así, por tanto, concluyó Galileo, esta ley debe también regir para el caso límite de la caída libre. El resultado obtenido puede ser expresado en forma matemática diferente diciendo que la distancia total recorrida durante cierto período de tiempo es proporcional al cuadrado de este tiempo o, como se acostumbraba a decir en los días de Galileo "*doble proporcional*" al tiempo. En efecto, si tomamos como unidad de longitud la distancia recorrida por la esfera en el primer intervalo de tiempo, el total de la distancia recorrida al final de los sucesivos intervalos, conforme a la ley del cuadrado, será 1^2, 2^2, 3^2, 4^2, etc., ó 1, 4, 5, 9, 16, etc. Así las distancias .cubiertas durante cada uno de los sucesivos intervalos de tiempo será 1 ; 4 —1 = 3 ; 9 — 4 = 5 ; 16 — 9 = 7, etc.[7]

De la dependencia observada de la distancia recorrida al tiempo, Galileo dedujo que la velocidad de este movimiento debe aumentar en proporción simple al tiempo. Veamos la prueba de esta afirmación con las propias palabras de Galileo[8].

En el movimiento acelerado, el aumento (de velocidad), siendo continuo, usted puede dividir los grados de velocidad ("valores de velocidad" en el moderno lenguaje), que aumentan continuamente en una cantidad determinada, a causa de que cambiando a cada momento son infinitos. Por tanto, podremos ejemplificar mejor nuestro propósito trazando un triángulo ABC (Figura 10).

Tomemos en el lado AC tantas partes iguales como nos plazca, AD, DE, EF, FG, GC y tracemos por los puntos D, E, F, G líneas rectas paralelas a la base BC.

Supongamos ahora que las partes señaladas en la línea AC representan tiempos iguales y que las paralelas trazadas por los puntos D, E, F y G representan para nosotros los grados de velocidad acelerada que aumentan igualmente en el mismo tiempo y que el punto A sea el estado de reposo, partiendo del cual el cuerpo ha

---

[7] Algebraicamente, si la distancia total recorrida al final del enésimo intervalo de tiempo es n^2, la distancia cubierta durante el último intervalo de tiempo es $n^2 - (n - 1)^2 = n^2 - n^2 + 2n - 1 = 2n - 1$

[8] Galileo Galilei, Dialogue on the Great World Systems. Chicago: Univ. of Chicago Press, 1953, págs. 244-45.

adquirido, por ejemplo, en el tiempo AD el grado de velocidad DH en el segundo tiempo supondremos que ha aumentado la velocidad de DH a EJ y asimismo en los tiempos siguientes, de acuerdo con el aumento de las líneas FK, GL, etc.

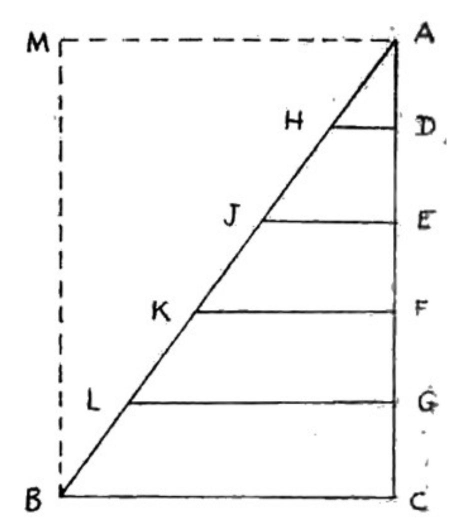


Figura 10. La prueba de Galileo de que en un movimiento (uniformemente) acelerado partiendo del reposo, la distancia recorrida por un móvil es la mitad de la distancia que el móvil habría recorrido si estuviera moviéndose todo el tiempo con la misma velocidad.

Pero, a causa de que la aceleración es continua de momento a momento y no por saltos de una cierta parte del tiempo a otra, representando el punto A el momento de menor velocidad, esto es, el estado de reposo, y AD el primer instante de tiempo siguiente, es evidente que, antes de adquirir el grado de velocidad DH en el tiempo AD, el cuerpo debe haber pasado por grados cada vez más pequeños adquiridos en los infinitos instantes que hay en el tiempo DA, correspondiendo a los infinitos puntos de la línea DA. Por tanto, para representarnos los infinitos grados de velocidad que preceden al grado DH es necesario imaginar líneas sucesivamente más cortas que se suponen están trazadas por los infinitos puntos de la línea DA y paralelas a DH.

Estas líneas infinitas representan para nosotros la superficie del triángulo AHD. Así, podemos imaginar toda distancia recorrida por el cuerpo, con el movimiento que comienza en el reposo y acelerado uniformemente, haber pasado y hecho uso de infinitos grados de velocidad que aumentan conforme a las infinitas líneas, que

comenzando desde el punto A se suponen trazadas paralelamente a la línea HD y a las restantes JE, KF y LG, continuando el movimiento hasta donde se quiera.

Completemos ahora el paralelogramo AMBC y prolonguemos hasta el lado BM, no solo las paralelas señaladas en el triángulo, sino también aquellas otras paralelas, en número infinito, que imaginamos trazadas desde todos los puntos del lado AC; y como BC, que es la mayor de estas infinitas paralelas del triángulo, representa para nosotros el grado mayor de velocidad adquirido por el móvil en el movimiento acelerado y la superficie entera de dicho triángulo era la masa y la suma de toda la velocidad con la cual en el tiempo AC recorrió cierto espacio, así ahora el paralelogramo es una masa y agregado de un número igual de grados de velocidad, pero cada uno igual al mayor BC. Esta masa de velocidades será el doble de la masa de las velocidades crecientes en el triángulo, como dicho paralelogramo es doble del triángulo y, por tanto, si el cuerpo que al caer empleó los grados acelerados de velocidad correspondientes al triángulo ABC ha recorrido tal distancia en tal tiempo, es muy razonable y probable que, empleando las velocidades uniformes correspondientes al paralelogramo, recorrerá con un movimiento igual en el mismo tiempo una distancia doble que la recorrida por el movimiento acelerado.

Debemos recordar que este enmarañado y engorroso lenguaje fue escrito en 1632 y traducido al inglés (por Thomas Salisbury) ¡en 1661! Aparte de ser la primera formulación de la ley de la caída libre, el transcrito pasaje del *Discorso* contiene también el primer paso en el desarrollo del llamado "cálculo integral" en el cual los resultados son obtenidos añadiendo números infinitamente grandes de cantidades infinitamente pequeñas. La ley de Galileo del movimiento uniformemente acelerado puede ser escrita de este modo en las actuales notaciones matemáticas:

$$\textit{Velocidad} = \textit{aceleración} \times \textit{tiempo}$$

$$\textit{Distancia} = 1/2\ \textit{aceleración} \times \textit{tiempo}^2$$

Para la caída libre, la aceleración, generalmente designada por la letra *g* (para gravedad), es igual a

$$981 \left(\frac{cm/seg}{seg} = \frac{cm}{seg^2} \right)$$

significando que a cada segundo después de que el cuerpo comienza a caer, su velocidad aumenta en 981 cm por segundo. En unidades anglo-americanas la unidad *g* es igual a 32,2 pies por segundo por segundo. Para dar un ejemplo, una bomba arrojada de un avión adquirirá en 10 seg la velocidad de

981 x 10 = 9.810 cm/seg = 98,1 m/seg ó 32,2 x 10 = 322 pies/seg

y caerá a la distancia de

1/2 x 981 x 10^2 = 49.050 cm = 0,49 km ó 1/2 x 32,2 x 10^2 = 1.610 pies.

Otra importante contribución de Galileo a los problemas de la dinámica fue la idea del movimiento compuesto que puede ser demostrada por el sencillo ejemplo siguiente:

Supongamos que tenemos una piedra a 5 pies sobre el suelo y la dejamos caer. Según la fórmula anterior, la piedra chocará contra el suelo a los 0,96 seg. después de haber sido soltada, así 1/2 x 32,2 x $(0,96)^2$ = 5 pies ¿Qué ocurre si, al soltar la piedra, le comunicamos también una velocidad horizontal de, por ejemplo, 10 pies por segundo?

Todo el mundo sabe por experiencia personal que en este caso la piedra describirá una trayectoria curva y caerá a alguna distancia de nuestros pies.

Para trazar la trayectoria de la piedra en este caso, debemos considerar la piedra como si tuviera dos movimientos independientes:

1) un movimiento horizontal con la velocidad constante que le fue comunicada en el momento de soltarla, y
2) un movimiento vertical de caída libre con la velocidad que aumenta proporcionalmente al tiempo.

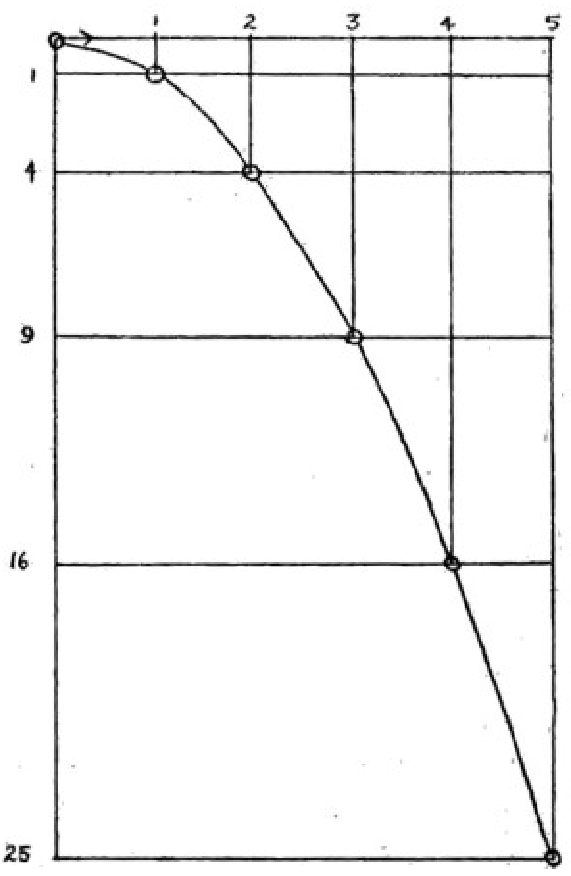


Figura 11. Composición de un movimiento uniforme en dirección horizontal y un movimiento acelerado en dirección vertical. La curva resultante es una parábola.

El resultado de la composición de estos dos movimientos se ve en la Figura 11. Sobre el eje horizontal señalamos trozos iguales correspondientes a las distancias recorridas por el móvil durante el primer segundo, el segundo segundo, etc. Sobre el eje vertical señalamos las distancias que aumentará como los cuadrados de los números enteros, de acuerdo con la ley de la caída libre. Las verdaderas posiciones del móvil se señalan por los pequeños círculos que figuran sobre una curva llamada parábola.

Si arrojamos la piedra con doble velocidad recorrerá en su movimiento horizontal distancias dobles, mientras su movimiento vertical sigue siendo el mismo. Como resultado, la piedra caerá a doble distancia de nuestros pies, pero su tiempo de vuelo en el aire será el mismo. (En todas estas consideraciones despreciamos el rozamiento del aire, que deformará ligeramente la trayectoria de la piedra arrojada.)

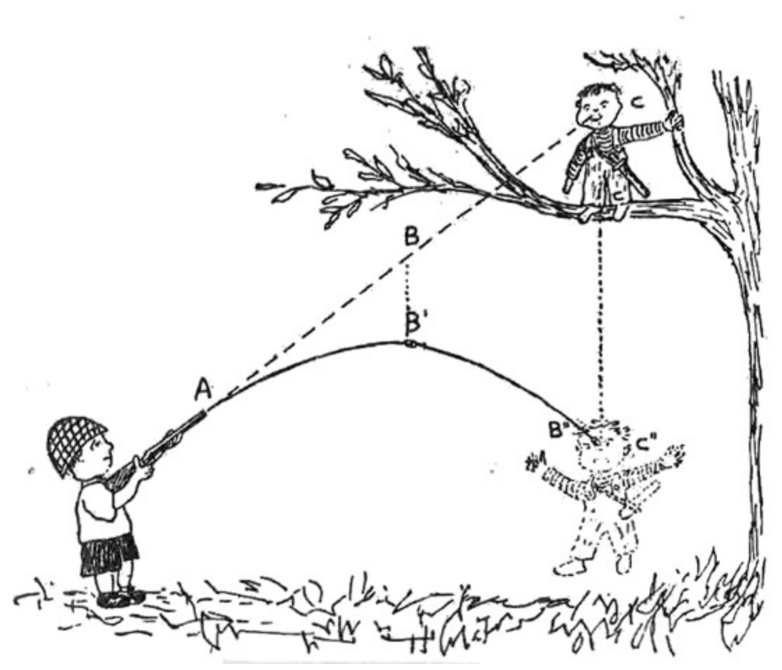


Figura 12. Como todos los cuerpos caen con la misma aceleración, si un niño que juega con otro a la guerra de la selva dispara un proyectil directamente al "enemigo", situado en la rama de un árbol, la bala dará exactamente en la nariz de este último, si se deja caer en el momento del disparo.

Una interesante aplicación del mismo principio es el problema de dos muchachos que juegan a la guerra de la selva (Figura 12). Un muchacho está en la rama de un árbol mientras el otro le dispara con una cerbatana. Supongamos que este último apunta directamente a su compañero que está en el árbol y que en el momento en que dispara, el último se suelta de la rama y comienza a caer al suelo. ¿Le valdrá la caída al suelo de algo? La respuesta es "no", y este es el porqué: Si no hubiera gravedad, el proyectil seguiría la línea recta ABC al punto donde el muchacho estaba primero. Pero a causa de la gravedad el proyectil comienza a caer en el momento en que sale del cañón y tenemos un doble movimiento: un movimiento uniforme a lo largo de la línea recta ABC al punto donde estaba el muchacho al principio, y un movimiento acelerado en la dirección vertical. Como todos los objetos materiales caen con la misma aceleración, el movimiento vertical del proyectil y el del muchacho son idénticos. Así, cuando la bala hubiera llegado al punto B, a medio camino del blanco primitivo, habría caído una distancia BB', que es igual a la distancia CC' recorrida por el muchacho en su caída. Cuando el

proyectil hubiera llegado al punto C, si no hubiera gravedad, habría caído la distancia CB" (dos veces la distancia BB') que es igual a la distancia CC" recorrida por el niño que cae. Así, el muchacho seria alcanzado precisamente en la nariz.

En lugar de arrojar una piedra o disparar una bala podemos arrojar un objeto desde un vehículo en movimiento. Supongamos que dejamos caer una piedra desde la cima de un mástil de un buque impulsado mecánicamente que se mueve rápidamente (una galera impulsada a remo de la época de Galileo). En el momento de soltar la piedra tendrá esta la misma velocidad horizontal que el barco y así continuará moviéndose con esta velocidad horizontal después de haberla soltado, quedando todo el tiempo exactamente sobre la base del mástil. La componente vertical del movimiento de la piedra será una caída libre y acelerada y así chocará contra la cubierta justo en la base del mástil. Lo mismo ocurrirá, naturalmente, si arrojamos un objeto dentro de un coche de un tren que se mueve o dentro de una cabina de un avión que vuela, cualquiera que sea la velocidad de estos vehículos.

Todo esto nos parece sencillo y evidente en nuestro tiempo, pero no así cuando vivía Galileo. Entonces se creía, conforme a las enseñanzas de Aristóteles, que dominaba el pensamiento científico de la época, que el objeto se mueve tanto tiempo como sea impulsado y se detendrá en cuanto desaparece la fuerza. De acuerdo con este punto de vista, una piedra que se deja caer de la cima de un mástil caerá verticalmente mientras el barco continúa avanzando. Así pues, se esperaba que la piedra chocara con la cubierta más cerca de la popa. Es característico del escolasticismo medieval que problemas de este género fueran discutidos en pro y en contra durante siglos y que nadie cuidara de subir al mástil de un buque en movimiento y ¡soltara desde allí una piedra!

La situación queda ilustrada por los siguientes pasajes del libro de Galileo *Diálogo sobre el Gran Sistema del Mundo*, publicado en 1632 en Florencia. Conforme a la tradición de los antiguos escritores griegos, Galileo compuso su libro como una conversación entre tres personajes de la maravillosa ciudad de Venecia: Salviatus, que habla por el autor mismo; Sagredus, un inteligente seglar, y Simplicius, un representante de la escuela aristotélica, no demasiado brillante. Aquí transcribimos sus argumentos relativos a una piedra que cae desde el mástil de un buque en

movimiento y de una torre levantada sobre la Tierra que, de acuerdo con Copérnico, se mueve.

Salviatus*. Aristóteles dice que el argumento más convincente de la inmovilidad de la Tierra es ver que los proyectiles arrojados o disparados verticalmente hacia arriba vuelven perpendicularmente por la misma línea al mismo punto del cual fueron arrojados o disparados. Y que esto es así, aunque el movimiento haya alcanzado una gran altura. Así que el argumento puede ser tomado tanto de un disparo hecho directamente hacia arriba por un cañón como del otro empleado por Aristóteles y Ptolomeo, de que los cuerpos pesados que caen de lo alto se observa que descienden por una línea recta y perpendicular a la superficie de la Tierra. Ahora bien, yo puedo comenzar a deshacer estos nudos; pregunto a Simplicius: en el caso de que uno negara a Ptolomeo y Aristóteles que los pesos que caen libremente de lo alto descienden en una línea recta y perpendicular, esto es, directamente al centro, ¿qué medios emplearíamos para probarlo?*

Simplicius*. Por medio de los sentidos, que nos aseguran que la torre o la altura está a plomo y perpendicular y nos muestran que la piedra se desliza a lo largo de la pared sin inclinarse el grosor del pelo a un lado o a otro y se posa en el suelo exactamente debajo del punto del que se la dejó caer.*

Salvatius. *Pero, ocurriera que el globo terráqueo girara y, por tanto, se llevara la torre con él y que la piedra entonces rozara y se deslizara a lo largo del lado de la torre, ¿cuál debía ser su movimiento entonces?*

Simplicius. *En este caso hablaríamos de sus movimientos, porque tendría uno por el cual descendería de lo alto al suelo y tendría otro siguiendo el movimiento de la torre dicha.*

Salvatius*. Así que su movimiento se compondría de dos; de esto se seguiría que la piedra no describiría una simple línea recta perpendicular sino una transversal y acaso no recta.*

Simplicius*. Yo no puedo decir nada acerca de su no rectitud, pero yo reconozco que necesariamente seria transversal.*

Salviatus. *Usted ve, por tanto, que si meramente observamos que la piedra cae a lo largo de la torre, usted no puede afirmar con seguridad que describe*

una línea recta y perpendicular, a menos que usted no suponga primero que la Tierra está quieta.

Simplicius*. Cierto, porque si la Tierra se moviera, el movimiento de la piedra seria transversal y no perpendicular.*

Salvatius*. La defensa de Aristóteles consiste entonces en la imposibilidad o al menos, a su juicio, una imposibilidad de que la piedra se moviera con un movimiento mezcla de rectilíneo y circular. Porque si no tuviera por imposible que la piedra pudiera moverse a la vez al centro y en torno al centro hubiera comprendido que pudiera ocurrir que la piedra que cae puede en su descenso rozar la torre lo mismo cuando ésta se mueve que cuando está quieta. En consecuencia, debe haber comprendido que de este razonamiento no se puede inferir nada tocante a la movilidad o inmovilidad de la Tierra. Pero esto no excusa en modo alguno a Aristóteles; porque el debió haberlo expresado, si tenía tal idea, por ser una parte tan sustancial de su argumento. Así pues, por esta razón no se puede decir que tal efecto es imposible o que Aristóteles lo juzgaba así. Lo primero no puede ser afirmado porque pronto veremos que no sólo es posible, sino necesario; ni tampoco lo segundo puede ser asegurado, porque el propio Aristóteles conviene en que el fuego se mueve naturalmente en I línea recta y se mueve alrededor con el movimiento diurno, comunicado por los cielos a todo elemento del fuego y la mayor parte de la capa alta del aire. Si, por tanto, Aristóteles tiene por posible mezclar el movimiento recto hacia arriba del fuego con el circular comunicado al fuego y al aire desde la concavidad de la esfera de la Luna, mucho menos debe considerar imposible la mezcla del movimiento recto de la piedra hacia abajo con el circular que suponemos natural a todo el globo terráqueo, del cual la piedra es una parte.*

Más tarde, en los Diálogos, Salviatus propone un experimento muy interesante encaminado a probar su punto de vista expresado en las anteriores discusiones:

Salvatius. *Usted muestra grandes escrúpulos sobre esto que, si no me equivoco, depende de otras instancias, respecto a los pájaros que, siendo animados, son, por tanto, capaces de usar su fuerza a voluntad contra el*

movimiento primario ínsito en los cuerpos terrestres. Por ejemplo, les vemos volar hacia arriba, una cosa que debe ser completamente imposible para los cuerpos pesados, mientras que cuando mueren únicamente pueden moverse hacia abajo. Y, por tanto, usted sostiene que las razones que valen para todos los géneros de proyectiles antes citados, no pueden valer para los pájaros. Ahora bien, esto es verdad y, por ser verdad, vemos, por tanto, a los pájaros vivos comportándose de modo diferente que los cuerpos que caen. Si de lo alto de una torre dejamos caer un pájaro muerto y otro vivo, el pájaro muerto hará lo mismo que la piedra, esto es, primero seguirá el movimiento general diurno y después el movimiento de caída, exactamente como la piedra. Pero si el pájaro que dejamos caer está vivo, ¿quién le impedirá (aun permaneciendo en el movimiento diurno) volar con auxilio de sus alas al punto del horizonte que le plazca? Y este nuevo movimiento, como particular del pájaro y no participado por nosotros debe hacérsenos necesariamente visible. En suma, el efecto del vuelo de los pájaros no difiere de los proyectiles disparados o arrojados a cualquier parte del mundo en nada, excepto que los proyectiles son movidos por una impulsión externa y los pájaros por un principio interno.

Como prueba final de todos los experimentos antes alegados, yo imagino ahora un tiempo y lugar conveniente para demostrar el modo de hacer un exacto ensayo de todos ellos. Ciérrese usted con algún amigo en la estancia más grande bajo la cubierta de algún gran barco y allí encierre también mosquitos, moscas y otras pequeñas criaturas aladas. Lleve además una gran artesa llena de agua y ponga dentro ciertos peces; cuelgue también una cierta botella que gotee su agua en otra botella de cuello estrecho colocada debajo. Entonces, estando el barco quieto, observe cómo estos pequeños animales alados vuelan con parecida velocidad hacia todas las partes de la estancia, cómo los peces nadan indiferentemente hacia todos los lados y cómo todas las gotas caen en la botella situada debajo. Y lanzando cualquier cosa hacia su amigo, usted no necesitará arrojarla con más fuerza en una dirección que en otra siempre que las circunstancias sean iguales, y saltando a lo largo usted llegará tan lejos en una dirección como en otra. Después de

observar estas particularidades creo que nadie dudará que mientras el barco permanezca quieto, deben ocurrir de esta manera. Haced ahora que el barco se mueva con la velocidad que usted quiera, siempre que el movimiento sea uniforme y no oscile en esta dirección y en aquélla. Usted no será capaz de distinguir la menor alteración en todos los efectos citados ni podrá colegir por uno de ellos si el barco se mueve o se está quieto. La causa de esta correspondencia de los efectos es que el movimiento del barco es común a todas las cosas que hay en él e incluso al aire; yo he supuesto que estas cosas estaban encerradas en la estancia, pero en el caso de que estén sobre cubierta al aire libre y no obligadas a seguir la marcha del barco, se observarían diferencias más o menos notables en alguno de los efectos citados y no hay duda que el humo se quedaría detrás como el aire mismo; las moscas y los mosquitos, impedidos por el aire, no podrán seguir el movimiento del buque si estaban separados de él a alguna distancia, pero manteniéndolas cerca de él a causa de que el barco mismo, siendo una estructura anfractuosa, transporta consigo parte del aire cercano, seguirían al barco sin pena ni dificultad. Por la misma razón, vemos a veces en los puestos de caballos, que los molestos tábanos siguen a los caballos volando unas veces a una parte del cuerpo, otras veces a otra. Pero en las gotas que caen la diferencia sería muy pequeña y en los saltos y los lanzamientos de cuerpos graves completamente imperceptibles.

Sagredus. *Aunque nunca me vino a las mientes hacer la prueba de estas observaciones cuando estaba en el mar, sin embargo, estoy seguro de que sucederá en la forma en que usted lo ha relatado. En confirmación de esto yo recuerdo que estando en mi camarote me he preguntado cientos de veces si el barco se movía o si se estaba quieto; y a veces he supuesto que se movía en una dirección cuando en realidad se movía en otra. Así pues, quedo satisfactoriamente convencido de la invalidez de todos aquellos experimentos que han sido realizados en prueba de la parte negativa.*

Pero ahora queda la objeción fundada sobre lo que nos muestra la experiencia, a saber, que una rueda que gira tiene la propiedad de expeler y dispersar las materias

adheridas a la máquina. En este hecho muchos fundan la opinión, y Ptolomeo entre otros, que si la Tierra girase con tan grande velocidad, las piedras y criaturas que están sobre ella serian lanadas al aire y que no habría mortero bastante fuerte para fijar los edificios a sus cimientos de modo que no sufrieran semejante expulsión.

Esta afirmación de que es imposible saber si un barco está andado o moviéndose en el mar mediante experimentos mecánicos en una cerrada cabina de su interior es conocido ahora como el "*principio de relatividad de Galileo*". Pasaron más de tres siglos de desarrollo de la física antes de que este principio fuera extendido por Albert Einstein al caso de los fenómenos ópticos y electromagnéticos cuando se les observa en una cabina cerrada que se mueve con movimiento uniforme. Tal fue la gran contribución de Galileo a la ciencia de la mecánica.

5. Galileo, el astrónomo

Además de ser uno de los primeros físicos experimentales y teóricos, Galileo también contribuyó poderosamente al progreso de la astronomía abriendo a la humanidad ilimitadas perspectivas del universo circundante. Su atención fue atraída primero por el cielo en el año 1604, cuando una brillante estrella nueva (de las que ahora llamamos novae) apareció de repente una noche entre las constelaciones inmutables conocidas desde hace milenios por los observadores de las estrellas. Galileo, que entonces contaba cuarenta años, demostró que la nueva estrella era realmente una estrella y no alguna clase de meteoro de la atmósfera terrestre y predijo que se desvanecería gradualmente. La aparición de una estrella nueva en el cielo, que se suponía absolutamente inmutable de acuerdo con la filosofía de Aristóteles y las enseñanzas de la Iglesia, le valieron a Galileo muchos enemigos entre sus colegas científicos y el alto clero. Solamente pocos años después de este primer paso en el estudio del cielo, Galileo revolucionó la astronomía construyendo el primer anteojo astronómico que describió con las siguientes palabras:

> *Hace unos diez meses llegó a mis oídos el rumor de que había sido construido por un holandés un instrumento óptico con cuya ayuda objetos visibles, aunque muy distantes de los ojos del observador, se veían distintamente como a un palmo de la mano, con lo que se enlazaron algunas historias de este maravilloso efecto al cual algunos dan crédito y otros niegan. Lo mismo*

me fue confirmado pocos días después por una carta enviada desde Paris por el noble francés Jacob Badovere, que acabó por ser la razón de que me aplicara a indagar la teoría y descubrir los medios de que yo pudiera llegar a la invención de un instrumento análogo; una finalidad que conseguí más tarde por las consideraciones de la teoría de la refracción. Primero preparé un tubo de plomo a cuyos extremos fijé dos lentes de cristal, ambas planas por una cara, pero por la otra una era esférica convexa y otra cóncava.

Después de construir el instrumento apuntó con él al cielo y ante sus ojos se desplegaron las maravillas del universo. Miró a la Luna y vio que:

La superficie de la Luna no es perfectamente llana, exenta de desigualdades y exactamente esférica, como una extensa escuela de filósofos consideraba al mirar a la Luna y otros cuerpos celestes, sino, por el contrario, está llena de desigualdades, es irregular, llena de depresiones y protuberancias, lo mismo exactamente que la superficie de Tierra, que varía dondequiera por virtud de altísimas montañas y profundos valles.

Miró a los planetas y vio que:

Los planetas presentan sus discos perfectamente redondos, lo mismo que si hubieran sido trazados por un compás y aparecen como otras tantas pequeñas lunas completamente iluminadas y de forma globular; pero las estrellas fijas no parecen a los ojos desnudos (esta es la primera vez que se usa esta expresión) como si estuvieran encerradas en una conferencia circular, sino más bien como llamaradas de luz que arrojan rayos hacia todos los lados y muy centelleantes, y con el telescopio parecen de la misma forma que cuando son contempladas a simple vista.

El 7 de enero de 1610 miró a Júpiter y:

Había allí tres estrellas, pequeñas pero brillantes, cerca del planeta, y aunque creí que pertenecían al número de las estrellas fijas, sin embargo algo me sorprendió en ellas, a causa de que estaban dispuestas exactamente en una línea recta paralela a la eclíptica y eran más brillantes que el resto de las

estrellas, iguales a ellas en magnitud... En el lado Este había dos estrellas y una sola al Oeste... Pero cuando el 8 de enero, llevado por una casualidad, volví a mirar la misma parte del cielo, encontré un estado muy diferente de cosas, porque había tres pequeñas estrellas todas al oeste de Júpiter y más cercanas unas de otras que en la noche anterior.

Así Galileo dedujo que:

Hay tres estrellas en el cielo moviéndose en torno a Júpiter como Venus y Mer= curio en torno al Sol.

Miró a Venus y Mercurio y descubrió que a veces tienen la forma de cuarto creciente o menguante lo mismo que la Luna, de donde concluyó que:

Venus y Mercurio giran en torno al Sol como todos los demás planetas. Una verdad ya sostenida por la escuda pitagórica, por Copérnico y por Keplero, pero nunca probada por la evidencia de nuestros sentidos como queda probada ahora en el caso de Venus y Mercurio.

Miró a la Vía Láctea y halló que:

...no es otra cosa que una masa de innumerables estrellas situadas juntas, en racimos.

Los descubrimientos de Galileo realizados mediante el uso del telescopio suministraron una prueba indiscutible de la exactitud del sistema copernicano del mundo y el habló jubiloso de ello. Pero esto era más de lo que podía permitir la Santa Inquisición; fue detenido y sometido a un largo período de confinamiento solitario e interrogatorios, que no parece, sin embargo, que cambiaran su espíritu de lucha. El 15 de enero de 1633, pocos meses antes de que fuera dictada la sentencia final, Galileo escribió a su amigo Ella Diodati:

Cuando yo pregunto de quién es la obra del Sol, la Luna, la Tierra, las Estrellas, sus movimientos y disposiciones probablemente se me contestará que son la obra de Dios. Si continúo preguntando de quién es obra la Sagrada Escritura se me responderá seguramente que es la obra del Espíritu Santo, es

decir, obra de Dios también. Si entonces pregunto si el Espíritu Santo usa palabras que son manifiestamente contradictorias con la verdad para satisfacer a la inteligencia de las masas, generalmente ineducadas, estoy convencido que se me contestará con muchas citas sacadas de todos los escritores santificados que esto es en efecto lo habitual en la Sagrada Escritura, que contiene cientos de pasajes que tomados al pie de la letra no serian más que herejía y blasfemia porque en ellos Dios aparece como un Ser lleno de odio, culpas y olvido. Si entonces pregunto si Dios, para ser comprendido por las masas, ha alterado siempre su obra o, de otro modo, si la Naturaleza inmutable e inaccesible como es para los deseos humanos, ha mantenido siempre el mismo género de movimiento, formas y divisiones del Universo, estoy seguro de que se me dirá que la Luna ha sido siempre esférica aunque durante mucho tiempo fue considerada como plana. Para resumir todo esto en una frase: Nadie sostendrá que la Naturaleza ha cambiado siempre para hacer aceptables sus obras a los hombres. Si es así, entonces yo pregunto por qué es así, a fin de conseguir una comprensión de las diferentes partes del mundo entonces debemos comenzar investigando las Palabras de Dios más bien que sus Obras. Es, entonces, la Obra menos respetable que la Palabra? Si alguien sostiene que es herejía decir que la Tierra se mueve y si posteriores verificaciones y experimentos mostrasen que así es en realidad ¡qué dificultades no encontraría la Iglesia! Si, por el contrario, todas las veces que no se pueden acordar las Obras y la Palabra, consideramos la Sagrada Escritura como secundaria, no se le produce ningún daño, porque frecuentemente ha sido modificada para acomodarse a las masas y frecuentemente ha atribuido falsas cualidades a Dios. Por tanto, yo debo preguntar ¿por qué, insistimos, siempre que hablamos del Sol o de la Tierra, en que la Santa Escritura debe ser considerada como absolutamente infalible?

El 22 de junio de 1633, a la edad de 69 años, Galileo fue llevado ante los jueces del Santo Oficio de la Iglesia y puesto de rodillas "confesó"[9]:

---

[9] Este es el texto original de la confesión de Galileo, que tenía entonces 69 años, 4 meses y 7 días de edad.

Yo, Galileo Galilei, hijo del difunto florentino Vicente Galilei, de setenta años de edad, comparecido personalmente en juicio ante este tribunal, y puesto de rodillas ante vosotros, los Eminentísimos y Reverendísimos señores Cardenales Inquisidores generales de la República cristiana universal, respecto de materias de herejía, con la vista fija en los Santos Evangelios, que tengo en mis manos, declaro, que yo siempre he creído y creo ahora y que con la ayuda de Dios continuaré creyendo en lo sucesivo, todo cuanto la Santa Iglesia Católica Apostólica Romana cree, predica y enseña. Mas, por cuanto este Santo Oficio ha mandado judicialmente, que abandone la falsa opinión que he sostenido, de que el Sol está en el centro del Universo e inmóvil; que no profese, defienda, ni de cualquier manera que sea, enseñe, ni de palabra ni por escrito, dicha doctrina, prohibida por ser contraria a las Sagradas Escrituras; por cuanto yo escribí y publiqué una obra, en la cual trato de la misma doctrina condenada, y aduzco con gran eficacia argumentos en favor de ella, sin resolverla; y atendido a que me he hecho vehementemente sospechoso de herejía por este motivo, o sea, porque he sostenido y creído que el Sol está en el centro del mundo e inmóvil y que la Tierra no está en el centro del Universo, y que se mueve.

En consecuencia, deseando remover de la mente de Vuestras Eminencias y de todos los cristianos católicos esa vehemente sospecha legítimamente concebida contra mí, con sinceridad y de corazón y fe no fingida, abjuro, maldigo y detesto los arriba mencionados errores y herejías, y en general cualesquiera otros errores y sectas contrarios a la referida Santa Iglesia, y juro para lo sucesivo nunca más decir ni afirmar de palabra ni por escrito cosa alguna que pueda despertar semejante sospecha contra mí, antes por el contrario, juro denunciar cualquier hereje o persona sospechosa de herejía, de quien tenga yo noticia, a este Santo Oficio, o a los Inquisidores, o al juez eclesiástico del punto en que me halle.

Juro además y prometo cumplir y observar exactamente todas las penitencias que se me han impuesto o que se me impusieren por este Santo Oficio.

Mas en el caso de obrar yo en oposición con mis promesas, protestas y juramentos, lo que Dios no permita, me someto desde ahora a todas las

penas y castigos decretados y promulgados contra los delincuentes de esta clase por los Sagrados Cánones y otras constituciones generales y disposiciones particulares. Así me ayude Dios y los Santos Evangelios sobre los cuales tengo extendidas las manos.

Yo Galileo Galilei arriba mencionado, juro, prometo y me obligo en el modo y forma que acabo de decir, y en fe de estos mis compromisos, firmo de propio puño y letra esta mi abjuración, que he recitado palabra por palabra.

Se dice que inmediatamente después de su "confesión", Galileo exclamó: *Eppur si mouve* (Y, sin embargo, se mueve), pero esto no es cierto y hay razones para la vieja anécdota según la cual Galileo estaba observando los movimientos del rabo de un perro amigo que por error había penetrado en el Santo Oficio de la Iglesia. Una vez convicto de herejía, Galileo fue confinado en su "villa" de Arcetri, cerca de Florencia, bajo lo que ahora llamamos "detención domiciliaria". El 8 de enero de 1642, completamente ciego y cansado de la vida, Galileo murió.

Capítulo 3
Dios dijo: "que Newton sea"[10]

El año en que Galileo moría en su reclusión de Florencia, un niño prematuro, bautizado con el nombre de Isaac, nacía en la familia de un agricultor del Lincolnshire apellidada Newton. Durante los primeros años de escuda Isaac no dio signos de su futura grandeza. Era un muchacho enfermizo, tímido, más bien retrasado en sus estudios. Lo que le sacó de este estado fue su primera riña con un compañero de la escuela que, además de ser uno de los mejores estudiantes de la clase, era muy agresivo hacia los otros muchachos. Al recibir un golpe en el vientre que le asestó este camorrista (cuyo nombre se ha perdido para la historia), Newton le desafió a luchar y le venció a causa de su "*espíritu superior y resolución*". Después de haber ganado en el aspecto físico, decidió completar su victoria en la batalla de la inteligencia y, trabajando esforzadamente, llegó a ser el primero de su clase. Después de ganar otra batalla con su madre que quería dedicarle a la agricultura, entró en el Colegio de la Trinidad a la edad de 18 años y se consagró al estudio de las matemáticas. En el año 1665, Newton tomó su grado de bachiller en artes sin ninguna distinción especial.

1. Progresos durante la peste

A mediados del verano de 1665, la Gran Peste cayó sobre Londres y a los pocos meses uno de cada diez londinenses había muerto de ella. En el otoño se cerró la Universidad de Cambridge por su proximidad al centro de la plaga y todos los estudiantes fueron enviados a sus casas. Así, Newton volvió al hogar de sus padres y permaneció allí dieciocho meses hasta que se volvió a abrir la Universidad.

Estos dieciocho meses fueron los más fecundos en su vida y se puede decir que durante este período concibió prácticamente todas las ideas que le debe el mundo.

Cito con sus propias palabras:

> *A comienzos de 1665 encontré la... regla para reducir cualquier dignidad (poder) de los binomios a serie*[11]*. El mismo año en 1 de mayo descubrí el*

---

[10] De unos versos de Alexander Pope (1688-1744): "La Naturaleza y sus leyes yacían ocultas en la noche; Dios dijo: "Que Newton sea", y todo se hizo luz."

[11] La llamada teoría del binomio de Newton que ahora se ensena en el álgebra de bachillerato.

método de las tangentes... y en noviembre el método directo de las fluxiones (es decir, los elementos de lo que ahora se llama cálculo diferencial) y al año siguiente, en enero, la teoría de los colores, y en el siguiente el método inverso de las fluxiones (es decir, el cálculo integral) y en el mismo año comencé a pensar en la gravedad extendiéndola a la órbita de la Luna... y... comparé la fuerza requerida para mantener la Luna en su órbita con la fuerza de la gravedad en la superficie de la Tierra.

El resto de su carrera científica se consagró al desarrollo de las ideas concebidas en el Lincolnshire.

A la edad de veintiséis años fue nombrado profesor de la Universidad de Cambridge y a los treinta, miembro de la Real Sociedad, el más alto honor científico en Inglaterra. Según sus biógrafos, Newton fue el ejemplo perfecto del profesor abstraído. "*Nunca se tomó una diversión o un pasatiempo, montando a caballo para tomar el aire, paseando o jugando a los bolos o algún otro ejercicio, porque pensaba que todas las horas que no se dedicasen al estudio eran horas perdidas.*" A menudo trabajaba hasta las primeras horas de la mañana, se olvidaba de comer y cuando un día apareció un momento en el comedor del colegio, "*sus zapatos estaban sucios, sus medias arrugadas y su pelo mal peinado*". Sumido siempre en sus pensamientos era muy ingenuo y nada práctico en los problemas cotidianos. Se cuenta que una vez hizo un agujero en la puerta de su casa para que su gata pudiera entrar o salir, y cuando la gata tuvo cría añadió al agujero grande un número de pequeños agujeros para cada uno de los gatitos.

Como persona, Newton no era muy agradable y a menudo se vio envuelto en polémicas con sus colegas, que pudieron ser el reflejo de su lucha con su compañero de escuda años antes. Tuvo una áspera disputa con otro físico de Cambridge, Robert Hooke (el fundador de la teoría de la elasticidad) respecto a su teoría de los colores así como sobre la prioridad en el descubrimiento de la ley de la gravitación universal. Otra disputa semejante de prioridad con el matemático alemán Gottfried Leibniz respecto a la invención del cálculo, y con el holandés Christian Huygens sobre la teoría de la luz. El astrónomo John Flamsteed, duro al hablar de Newton, le describió como "*insidioso, ambicioso, excesivamente ávido de*

alabanzas, amigo de contradicción..., un buen hombre en el fondo Pero, por naturaleza, suspicaz".

A lo largo de sus años de Cambridge, Newton trabajó en el desarrollo de las brillantes ideas que había concebido entre los 23 y los 25 años, pero mantuvo en secreto la mayoría de sus experimentos. Esto explica el hecho de que toda su obra fuera publicada mucho más tarde: la obra sobre mecánica y gravedad a la edad de 44 años y la obra óptica a la edad de 65.

2. Los "Principia" de Newton

En el prefacio (fechado en 8 de mayo de 1686) a su libro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Principios matemáticos de filosofía natural)[12], Newton escribió:

> *Como los antiguos consideraban la ciencia de la mecánica como de suma importancia en la investigación de las cosas naturales, y los modernos, rechazando las formas sustanciales y las cualidades ocultas, han procurado someter los fenómenos de la naturaleza a las leyes de la matemática, en este tratado he cultivado las matemáticas en cuanto que se relacionan con la filosofía (natural). Los antiguos consideraban la mecánica en un doble aspecto: como racional, que procedía exactamente por demostración, y como práctica. A la mecánica práctica pertenecen todas las artes manuales (ingeniería) de la cual la mecánica ha tomado su nombre. Pero como los artesanos no trabajan con perfecta exactitud suele ocurrir que la mecánica es tan distinta de la geometría que a lo que es completamente exacto se le llama geométrico; a lo que lo es menos se le llama mecánico. Sin embargo, los errores no están en el arte, sino en los artesanos. El que trabaja con menos exactitud es un mecánico deficiente, y si alguno pudiera trabajar con completa exactitud seria el mecánico más perfecto de todos...*
>
> *Yo considero la filosofía (natural) más bien que las artes y escribo tocante no a las fuerzas manuales, sino a las naturales, principalmente de aquellas cosas que se relacionan con la gravedad, flotación, fuerza elástica, la resistencia de los fluidos y fuerzas semejantes, sean atrayentes o impulsivas, y, por tanto,*

[12] En aquel tiempo, "filosofía natural" significaba el estudio de las leyes de la Naturaleza

ofrezco esta obra como los principios matemáticos de la filosofía (natural) porque todo el problema de la filosofía parece consistir en esto: partiendo de los fenómenos de los movimientos investigar las fuerzas de la Naturaleza y partiendo de estas demostrar los demás fenómenos...

Así pues, pretendo derivar... los fenómenos de la Naturaleza de principios mecánicos porque he sido inducido a sospechar que todo puede depender de ciertas fuerzas por las cuales las partículas de los cuerpos, por alguna causa todavía desconocida, son recíprocamente impulsadas unas hacia otras y unirse en figuras regulares o repelidas y alejadas unas de otras. Por ser desconocidas estas fuerzas, los filósofos han intentado en vano hasta ahora la investigación de la Naturaleza, pero espero que los principios aquí formulados arrojen alguna luz bien a este o a algún método más verdadero de filosofía (natural).

En estas palabras Newton trata el programa de la llamada interpretación mecanicista de los fenómenos físicos, un punto de vista que ha dominado la física hasta principios de este siglo y sólo sucumbió bajo el efecto de la teoría de la relatividad y la teoría de los "*quanta*". Después de formular su objetivo, Newton procedió a desarrollar el tratamiento matemático de los fenómenos mecánicos en forma tan clara y precisa que pueden ser empleados sin alteración en cualquier libro moderno de mecánica clásica. Reproducimos los pasajes iniciales de los *Principia* de Newton sin más que algunas explicaciones (entre paréntesis) para aclarar la significación moderna de la terminología científica del siglo XVII.

3. Definiciones

Definición 1. *La cantidad de materia (masa) es la medida de la misma que resulta de su densidad y tamaño (volumen) conjuntamente.*

Así, aire de una doble densidad en un doble espacio (volumen) es cuádruple en cantidad; en un espacio (volumen) triple, séxtuplo en cantidad. La misma cosa ocurre con la nieve y el polvo fino o polvos que condensan por comprensión o licuefacción y de todos los cuerpos que por alguna causa son condensados

diferentemente. (En lenguaje moderno, decimos que la masa de un objeto dado es un producto de su densidad multiplicada por su volumen.)

Definición 2. *La cantidad de movimiento es la medida del mismo que resulta de la velocidad y la cantidad-de materia conjuntamente.*
(En lenguaje moderno, la cantidad de movimiento, ahora llamada usualmente “momento mecánico" o simplemente "momento" es el producto de la velocidad por la masa del objeto móvil.)
El movimiento del conjunto es la suma del movimiento de todas las partes, y por tanto, en un cuerpo doble en cantidad (de doble masa), con igual velocidad, el movimiento (momento mecánico) es doble; con doble velocidad, es cuádruple.

Definición 3. *La* vis insita *o fuerza de la materia es el poder de resistir, con la cual todo cuerpo, en tanto que está en él, continúa en su estado actual, sea que está quieto o moviéndose uniformemente adelante en línea recta.*
La fuerza es siempre proporcional al (a la masa del) cuerpo cuya fuerza es él y no difiere nada de la inactividad de la masa, salvo en la manera de concebirla. A un cuerpo, a causa de la inerte naturaleza de la materia, no se le puede sacar sin dificultad de su estado de reposo o de movimiento. Por esta razón, esta *vis insita* puede ser llamada con la denominación más significativa de "inercia" (*vis inertiae*) o fuerza de inactividad.

Definición 4. *Una fuerza imprimida es una acción ejercida sobre un cuerpo para cambiar su estado, bien de reposo, bien de movimiento uniforme en una línea recta.*
Esta fuerza subsiste solamente en la acción, y no continúa ya en el cuerpo cuando termina la acción. Un cuerpo mantiene todo el nuevo estado (de movimiento) que adquiere únicamente por virtud de su inercia. Pero las fuerzas imprimidas son de orígenes diferentes, procedentes de la percusión, de la presión, de la fuerza centrípeta.

Después de definir las nociones de *masa, momento, inercia y fuerza*, Newton procede a la formulación de las leyes básicas del movimiento:

Ley I. *Todo cuerpo continúa en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta a menos que sea forzado a cambiar ese estado por fuerzas que actúan sobre él.*

Los proyectiles continúan en su movimiento, mientras no sean retardados por la resistencia del aire o impulsados hacia abajo por la fuerza de gravedad. Un trompo, cuyas partes de su cohesión son continuamente impulsadas por movimientos rectilíneos, no cesa en su rotación más que cuando es retardado por el aire. Los grandes cuerpos de los planetas y cometas, encontrando menos resistencia en los espacios libres, mantienen sus movimientos, progresivo y circular, por mucho más tiempo.

Ley II. *El cambio de movimiento (es decir, de momento mecánico) es proporcional a la fuerza motriz que se le ha impreso, y sigue la dirección de la línea recta en que se le imprimió la fuerza.*

Si una fuerza origina un movimiento, una doble fuerza engendrará un movimiento doble, una fuerza triple un movimiento triple, lo mismo si la fuerza se le ha comunicado junta de una vez que gradual y sucesivamente. Y este movimiento (siempre dirigido en la misma dirección que la fuerza generadora), si el cuerpo ya se movía antes, se añade o resta del movimiento anterior, según que coincida directamente con él o sean directamente contrarios entre sí; o unidos oblicuamente, cuando son oblicuos, produciendo así un nuevo movimiento compuesto por la determinación de los dos.

La segunda ley de Newton puede ser formulada de una manera algo distinta. Como la cantidad de movimiento es el producto de la masa del cuerpo móvil multiplicada por su velocidad, el valor del cambio de movimiento es el producto de la masa multiplicada por el valor del cambio de velocidad, es decir, la aceleración. Así se deduce que la aceleración de un objeto sobre el cual actúa cierta fuerza, es directamente proporcional a esta fuerza e inversamente proporcional a la masa del objeto. Sobre la base de esta ley podemos introducir una unidad de fuerza definiéndola como una fuerza, que actuando sobre un objeto que tiene la masa de 1 gramo, le comunica la aceleración de 1 cm por segundo cada segundo. Esta unidad

de fuerza es la llamada *dina* y es más bien pequeña, aproximadamente la fuerza con la cual una hormiga empuja su carga. En ingeniería se usa a menudo una unidad que es 10^5 mayor y se llama un *newton*.

Cuando una fuerza que actúa sobre un objeto lo desplaza a una cierta distancia, el producto de esta fuerza por la distancia se conoce como el trabajo hecho por ella. Si la fuerza se expresa en dinas y la distancia en centímetros, el trabajo será medido en unidades llamadas *ergios*. Para las finalidades de la ingeniería se emplea una unidad de energía mucho mayor llamada *julio* igual a 10^7 ergios. También se puede introducir la unidad de potencia que indica la cantidad de trabajo desarrollada en la unidad de tiempo; se suele medir en ergios por segundo y no tiene nombre especial. En ingeniería se usa el vatio que es 1 julio por segundo ó 10^7 ergios por segundo, o el "*caballo de vapor*", que es igual a 751 vatios ó 0,751 kilovatios.

Ley III. *A toda acción se opone siempre una reacción igual; o las acciones recíprocas de dos cuerpos uno sobre otro son siempre iguales y dirigidas a partes opuestas.*

Cualquiera que tire o presione a otro será tirado o presionado por este otro. Si usted aprieta a una piedra con su dedo, el dedo es también presionado por la piedra. Si un caballo tira de una piedra unida a una cuerda, el caballo (si así puede decirse) es igual tirado hacia atrás por la piedra; porque la cuerda distendida, por el mismo esfuerzo a soltarse, tirará del caballo hacia la piedra tanto como la piedra lo haga hacia el caballo e impedirá el progreso de uno tanto como avanza el del otro...

¿Por qué entonces, se puede preguntar, está el caballo tirando de la piedra y no la piedra tirando del caballo? La respuesta es, desde luego, que la diferencia está en el rozamiento contra el suelo. Las cuatro patas del caballo se adhieren más al suelo que la piedra de la que tira el caballo, y si no fuera así la piedra quedaría en su sitio y las pezuñas del caballo resbalarían. Si se pusieran rodillos debajo de la piedra se reduciría el frotamiento contra el suelo y la tarea del caballo sería más fácil. Si falta el rozamiento, lo que casi ocurre en la superficie de un estanque helado, el movimiento de dos objetos que tiran o empujan uno a otro no será el mismo a no ser que tengan exactamente masas iguales, puesto que para una fuerza dada la aceleración es inversamente proporcional a la masa. Si un hombre delgado y un hombre gordo están de pie frente a frente sobre una superficie helada empujándose

uno a otro, el hombre delgado se deslizará hacia atrás con mucha mayor velocidad que el gordo. Análogamente, la velocidad de retroceso de un rifle es mucho más pequeña que la velocidad del proyectil (mucho más ligero) disparado por su cañón.

El principio del retroceso se emplea en la construcción de toda clase de cohetes. Los gases resultantes de la combustión del combustible del cohete fluyen hacia atrás a través de la tobera a gran velocidad, y como resultado de esto el cuerpo del cohete es impulsado hacia delante. La velocidad final adquirida por un cohete depende de la razón del peso del cohete al del combustible, y para la mejor ejecución se debe hacer que esta razón sea lo más pequeña posible. En los modernos proyectiles-cohetes, la relación del peso del cohete vacío al peso del combustible es aproximadamente la misma que la relación del peso de una cáscara de huevo al cuerpo del huevo.

No es este, lugar para discutir los problemas de ingeniería de la cohetería moderna y nos limitaremos a mencionar un incidente ocurrido en la estación de pruebas de grandes cohetes en Cabo Cañaveral (Florida). Al comentar la primera lección en el primer grado de una escuela local elemental, el maestro quiso conocer lo que las muchachas y los muchachos sabían sobre los tres R.

—Yo puedo contar —dijo voluntariamente el pequeño Johny.

—Ponte delante —dijo el maestro— y cuenta.

—Diez, nueve, ocho —comenzó Johny—, siete, seis, cinco, cuatro, tres, dos uno... pum!

Pero para volver a Newton, sin abandonar repentinamente el problema de los vuelos espaciales, debemos mencionar que él fue el primero que tuvo la idea de un satélite terrestre. En la tercera parte de los Principia leemos:

El hecho de que, por virtud de las fuerzas centrípetas, los planetas puedan ser retenidos en ciertas órbitas podemos comprenderlo fácilmente si consideramos el movimiento de los proyectiles; cuando es proyectada una piedra, a causa de la presión de su propio peso está forzada a seguir la trayectoria rectilínea, que por la proyección inicial sola debiera de haber seguido, y a describir una línea curva en el aire y, por virtud de esta línea

encorvada termina por caer al suelo; cuanto mayor es la velocidad con la cual es proyectada tanto más lejos irá antes de caer a tierra.

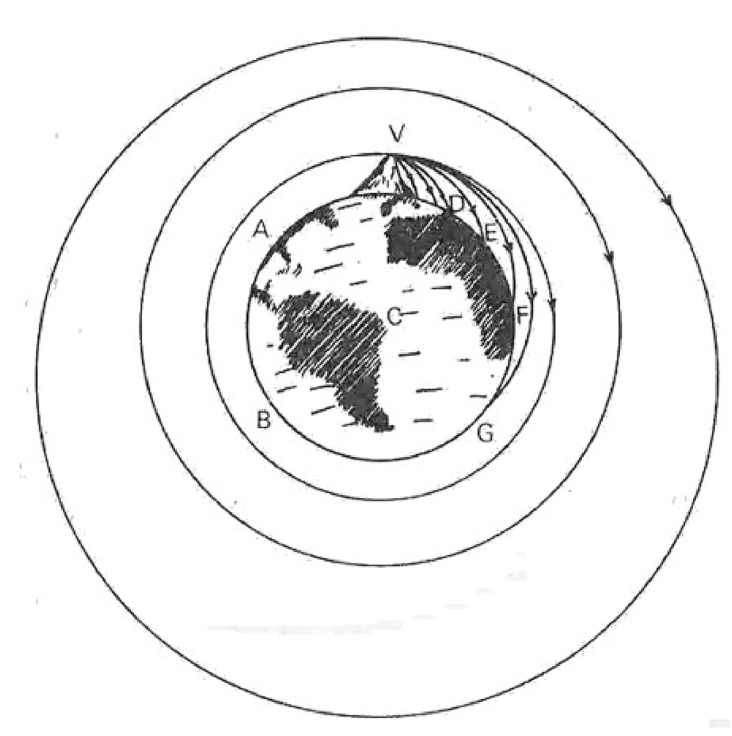


Figura 13. La trayectoria del satélite de la Tierra como caso límite de las trayectorias de proyectiles que caen cada vez a más distancia de la base de la montaña de la cual fueron arrojados. (Adaptación del dibujo original inserto en los Principia de Newton.)

Podemos, por tanto, suponer que la velocidad aumente de modo que describiera un arco de 1, 2, 5, 10, 100, 1.000 millas antes de que llegue al suelo, hasta que al fin, excediendo los límites de la Tierra pasaría al espacio sin tocar en ella. Hagamos que AFB (Figura 13) represente la superficie de la Tierra; sea C su centro, VD, VE , VF, las líneas curvas que un cuerpo describiría, si fuera proyectado en dirección horizontal desde la cumbre de una elevada montaña (en algún lado del país montañoso de Escocia, sin duda) sucesivamente con velocidades cada vez mayores; y por razón de que los movimientos celestes se retrasan escasamente por la pequeña o ninguna resistencia de los espacios en que son efectuadas para mantener la paridad de los casos supongamos que no hay aire sobre la Tierra o al menos que está dotado con poco o ningún poder de resistencia; y por la misma razón que el

cuerpo proyectado con menor velocidad describe el arco VD más pequeño y con mayor velocidad el arco mayor VE y aumentando la velocidad va cada vez más lejos a F y G, si la velocidad fuera todavía aumentada cada vez más llegaría al fin al otro lado de la circunferencia de la Tierra para volver a la montana de que había partido.

Pero si imaginamos cuerpos proyectados en las direcciones de líneas paralelas al horizonte desde alturas mayores de 5, 10, 100, 1.000 millas o más bien como varios semidiámetros de la Tierra, estos cuerpos, según sus diferentes velocidades, y las diferentes fuerzas de gravedad a las diferentes alturas, describirán bien arcos concéntricos con la Tierra o diversamente excéntricos y se irán girando a través de los cielos en órbitas lo mismo que lo hacen los planetas en las suyas.

Este pasaje incluye la idea de que una y la misma fuerza, la fuerza de gravedad, es responsable tanto de la caída de una piedra y del movimiento de los cuerpos celestes, idea que Newton se dice que tuvo primero al ver una manzana caer de un árbol. Si la "teoría de la manzana" es cierta o no, llevó a unos versos interesantes que transcrito:

Sir Isaac, que paseaba sumido en sus pensamientos,
fue abordado por un granjero vecino
y, sacado de las leyes de la gravedad,
persuadido por el hombre a detenerse
y charlar un rato. A lo largo la brisa
sembraba con las pálidas flores
de manzano de los árboles
del hortelano amigo de Newton
la carretera de lado a lado.
El vecino dijo a Newton: "Deténgase.
Me gustaría hablar unas palabras con usted.
Por el pueblo corren rumores
de que usted ha ganado fama
observando la caída de las manzanas.

Dígame, por favor, si se me caen todas."
"¡Claro que sí! ", dijo Newton.
"Si, desde luego, usted no ve que la misma fuerza
que disminuye como el cuadrado
de la distancia hasta ella
que actúa sobre nuestra fiel Luna
actúa sobre la manzana.
Más tarde o más pronto..."
"Por favor —dijo el vecino—,
déjelo porque eso no es lo que quiero saber;
lo único que me interesa sobre
los manzanos florecidos y todas sus manzanas,
una por una, es que maduren al buen sol
a lo largo de esta carretera tranquila
y cuánto debo cobrarle por la lata."

(Versos no publicados de un autor ruso anónimo)

Para establecer la dependencia de la fuerza de la gravedad de la distancia al centro de la Tierra, Newton decidió comparar la caída de una piedra (o una manzana) sobre la superficie terrestre con el movimiento de la Luna que puede ser considerado como una caída sin fin, según el razonamiento antes expuesto. De este modo, Newton pudo comparar la fuerza "astronómica" que actúa sobre la Luna con la fuerza "terrestre" que actúa sobre los objetos que manejamos en la vida cotidiana.

Su razonamiento, en forma algo modificada, se representa en la Figura 14, que muestra a la Luna, M girando alrededor de la Tierra, E, por una órbita casi circular. En la posición M, la Luna lleva una velocidad que es perpendicular al radio del círculo. Si no hubiera fuerzas, la Luna seguiría una línea recta y, en una unidad de tiempo más tarde, se movería a la posición M'. Como, no obstante, llega a la posición de M", el trayecto MM" debe ser considerado como la distancia recorrida por la Luna durante una unidad de tiempo en su caída libre hacia la Tierra.

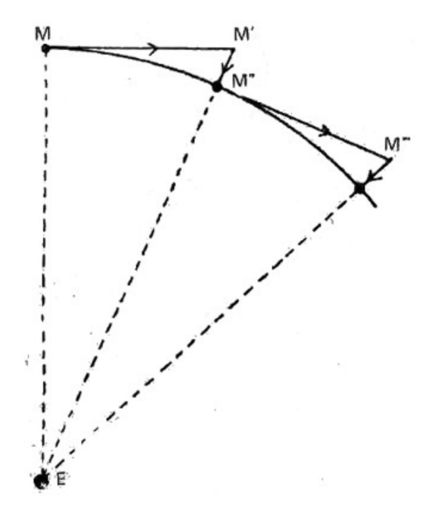


Figura 14. Considerando el movimiento circular de la Luna en torno de la Tierra como una caída continua (véase figura 13), Newton pudo calcular la aceleración producida por la fuerza de la gravedad actuando sobre la Luna. El diagrama muestra cómo.

Conforme al teorema de Pitágoras

$$M'M" = \sqrt{(EM^2 + MM')^2} — EM$$

(puesto que EM"= EM), lo que puede ser demostrado algebraicamente que es igual (porque MM « EM) a:

$$\frac{(MM')^2}{2EM} \text{ ó } \frac{1}{2}\left(\frac{MM'}{EM}\right) \cdot EM$$

donde MM'/EM es evidentemente la velocidad angular de la Luna en su movimiento alrededor de la Tierra, es decir, el cambio de posición angular de la Luna en el transcurso de 1 segundo. Como la Luna describe un círculo completo en un mes, la velocidad angular es igual a 2π dividido por la longitud de un mes expresado en segundos = $2{,}66 \times 4 \times 10^{-6}$. Pero en la exposición del movimiento acelerado ya hemos visto que la distancia recorrida durante el primer segundo es igual a la mitad de la cantidad conocida como "aceleración", de suerte que concluimos que la aceleración debida a la fuerza que sostiene a la Luna en su órbita circular es $(MM'/EM)^2 \times EM$. Empleando el valor arriba citado para la velocidad angular y

sustituyendo por la distancia a la Luna los valores de 384.400 km ó 3,84 x 10^{10} cm, Newton obtuvo para la aceleración debida a la gravedad a la distancia de la Luna, el valor: 0,27 cm/seg^2, que es mucho más pequeña que la aceleración de la gravedad sobre la superficie de la Tierra (981 cm/seg^2). Existe, no obstante, una correlación muy sencilla, por una parte, entre estas dos cantidades, y por otra, entre las distancias de la Luna y de una manzana que cae al centro de la Tierra. En efecto, la razón de 981 a 2,27 es 3,640 que es exactamente igual al cuadrado del número que representa la relación del radio de la órbita de la Luna al radio de la Tierra. Así es como Newton llegó al resultado de que las fuerzas de la gravedad terrestre decrecen como el cuadrado inverso de la distancia al centro de la Tierra.

Generalizando este descubrimiento a todos los cuerpos materiales del Universo, Newton formuló la ley universal de gravedad según la cual:

> *todo cuerpo material atrae a otro con una fuerza directamente proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos*.

Mediante la aplicación de esta ley al movimiento de los planetas en torno al Sol, derivó matemáticamente de las tres leyes de Keplero expuestas en el capítulo anterior.

El desarrollo de la obra de Newton realizada por los grandes matemáticos de los siglos XVIII y XIX originó una gran rama de la astronomía conocida como "mecánica celeste", que nos permite calcular con gran precisión el movimiento de los planetas del sistema solar bajo la acción de la mutua atracción gravitatoria. Uno de los mayores triunfos de la mecánica celeste se registró en 1846 con el descubrimiento de un nuevo planeta, Neptuno, cuya existencia y órbita fueron predichas independientemente por el astrónomo francés U. J. J. Leverrier y el astrónomo inglés J. C. Adams sobre la base de las perturbaciones del movimiento de Urano producidas por la atracción gravitatoria del planeta entonces desconocido. Un acontecimiento análogo ocurrió en 1930 cuando un planeta trans-neptuniano, llamado después Plutón, fue descubierto como resultado de cálculos teóricos.

Mediante la aplicación de su ley de gravedad al movimiento del globo terráqueo, Newton dio la primera explicación del fenómeno de la "precesión de los equinoccios"

conocida desde los tiempos de Plutarco. Demostró que, como el eje de rotación de la Tierra está inclinado respecto al plano de su órbita (eclíptica), la fuerza de gravedad del Sol, al actuar sobre el abultamiento ecuatorial del globo, debe producir una lenta rotación del eje de la Tierra en torno a una línea vertical a la eclíptica en un período de unos 26.000 años. Esta explicación encontró fuerte oposición entre los astrónomos contemporáneos porque en aquel tiempo se creía, sobre la base de mediciones erróneas, que nuestra Tierra no tiene la forma de una calabaza, más ancha por el ecuador, sino más bien la de un melón, con la distancia entre los polos mayor que el diámetro ecuatorial.

Para zanjar la polémica, el matemático francés P. L. M. de Maupertuis organizó una expedición a Laponia para medir la longitud de un grado de meridiano en las latitudes septentrionales y le ocurrieron una serie de aventuras con una manada de lobos. Sus mediciones probaron que la opinión de Newton era correcta y Voltaire le escribió humorísticamente:

> *Vous avez, confirmé dans les lieux pleins d'ennui*
> *Ce que Newton connût sans sortir de la chez lui*[13].

Siguiendo las mismas líneas, Newton explicó el fenómeno de las mareas como debidas a la desigual fuerza gravitatoria ejercida por el Sol sobre los hemisferios terrestres al girar hacia él y lejos de él.

Las 626 páginas de los *Principia* de Newton están atestadas de información sobre todas las ramas de la dinámica de los sólidos y los fluidos, pero nos limitaremos a explicar otro problema porque es sencillo y entretenido. Se trata del movimiento de proyectiles arrojados o disparados con cierta velocidad inicial a través de un medio resistente como el aire o el agua. ¿Hasta dónde se moverá antes de llegar al reposo?

La situación se muestra gráficamente en la Figura 15 en la cual un proyectil disparado por un fusil se mueve a través del aire o el agua como puede ser el caso. Mientras se mueve a través del medio, el proyectil tiene evidentemente que empujar a un lado el medio para perforar un túnel a fin de poder avanzar. A las

---

[13] Habéis confirmado en los países llenos de aburrimiento lo que Newton conoció sin salir de su casa

velocidades elevadas, las fuerzas de rozamiento son relativamente de poca importancia y la principal pérdida de energía que experimenta el proyectil se debe a la necesidad de comunicar una velocidad elevada al medio que tiene que apartar.

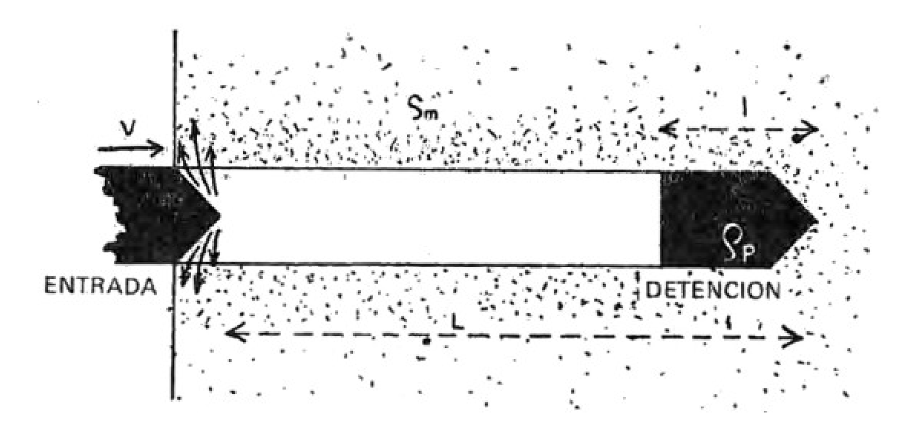


Figura 15. Teoría de Newton sobre la penetración de proyectiles en un medio.

Es fácil ver que la velocidad lateral del medio es aproximadamente la misma que la velocidad del proyectil que avanza. Así, el proyectil se detendrá cuando la masa del medio movida a un lado es del mismo orden de magnitud que su propia masa. Por tanto, concluimos que la longitud del túnel está en la misma relación con la longitud del proyectil que la densidad del material del proyectil con la densidad del medio,

$$\frac{L}{l} = \frac{\rho_p}{\rho_m}$$

que, claro está, es verdad sólo muy aproximadamente. Pero aun así, obtendremos varios resultados interesantes. Si disparamos un proyectil de acero (densidad unas 10 veces mayor que la del agua) a través del aire (densidad unas 1.000 veces menor que la del agua), puede esperarse que el proyectil se detenga después de recorrer 10.000 veces su longitud (si no cae al suelo antes). Así, los proyectiles de la artillería naval de gran alcance, que pueden tener 5 pies o más de longitud, recorrerán unos 50.000 pies o más de 10 millas. Por otra parte, la bala de media pulgada de longitud de un revólver de señora apenas recorrerá más de 400 pies. En el agua, que sólo es unas 10 veces menos densa que el metal, una bala perderá casi toda su energía después de recorrer sólo 10 veces su longitud. Es interesante

que la longitud de penetración no dependa de la velocidad inicial del proyectil (siempre que su velocidad sea suficientemente elevada). Este es el hecho que confundió a los expertos militares de los Estados Unidos que estaban haciendo caer desde diferentes alturas los proyectiles explosivos que se suponía penetrarían profundamente en el suelo antes de estallar. La penetración no parece modificarse con la altura desde la cual caían los proyectiles (por tanto, chocando con el suelo a diferentes velocidades) y los expertos estuvieron rascándose la cabeza hasta que alguien les señaló la teoría sobre esta cuestión contenida en los *Principia* de Newton.

4. Estática y dinámica de los fluidos

Los estudios de Sir Isaac sobre el equilibrio y movimiento de los fluidos fueron complementados y ampliados por el matemático francés Blaise Pascal, que tenía 19 años cuando nació Newton, y el físico suizo Daniel Bernoulli, que tenía 27 años cuando murió Newton. La ley de Pascal, que con la ley de Arquímedes forma la base de la hidrostática, dice que un fluido (sea un líquido o un gas) comprimido dentro de un continente cerrado ejerce la misma presión por unidad de superficie en todas las partes del continente. El principio de Pascal ha encontrado amplia aplicación en la construcción de varios aparatos hidráulicos. En efecto, si tenemos dos cilindros A y B de diferente diámetro enlazados por un tubo delgado y provistos de pistones movibles, la fuerza total que actúa sobre el pistón en el cilindro más ancho será mayor que la que actúa sobre el pistón del más estrecho, proporcionalmente a sus áreas. Así, una fuerza relativamente pequeña aplicada por la mano al pistón en el cilindro estrecho resulta en una fuerza mucho mayor actuando sobre el cilindro más ancho y puede levantar un carruaje pesado. Pero la contrapartida es que el desplazamiento del pistón en el tubo más ancho será correspondientemente más pequeño que el del pistón en el más estrecho.

La ley de Bernoulli, o principio como ha sido llamado frecuentemente, se refiere al movimiento de los fluidos dentro de tubos de diámetro variable, y a primera vista parece contradecir el sentido común. Imaginemos un tubo ancho horizontal que se estrecha en algún puno y después vuelve a ensancharse. El agua corre a través del tubo y su presión en las diferentes secciones puede ser medida por las alturas de

las columnas de agua en tubos verticales sujetos en distintos puntos sobre el tubo principal horizontal. Parece a primera vista que la presión será más alta en la sección estrecha del tubo puesto que el agua ha de comprimirse a su través. Sin embargo, el experimento directo indica que la situación es exactamente la contraria y que la presión del agua en la sección estrecha es más baja que en la más ancha. La explicación puede ser obtenida considerando el cambio de la velocidad del flujo en las diferentes secciones del tubo. En la sección ancha el agua se mueve relativamente con más lentitud y se acelera al entrar en la sección más estrecha. Para acelerar el movimiento del agua debe haber una *fuerza* que actúa en esa dirección y la única fuerza que se puede pensar aquí es la *diferencia de presión* entre los tubos ancho y estrecho. Como la velocidad del agua aumenta después de que entra en el tubo estrecho y la fuerza debe actuar en la dirección de la corriente, la presión en el tubo más ancho tiene que ser más alta que en el tubo más estrecho.

Se puede demostrar este hecho sin llamar al fontanero, procurándose simplemente un trozo de tubo de cristal (una boquilla de cigarrillo probablemente serviría también), un disco de cartón y un alfiler. Se clava el alfiler a través del centro del disco y se coloca en el tubo, de suerte que el peso del disco presione sobre el borde del tubo. Si ahora se sopla en el otro extremo del tubo podría esperarse que el disco sería fácilmente elevado. Inténtese y se verá que no es así y que cuanto más fuerte se sople más se apretará el disco contra el extremo del tubo. La explicación está fundada en el principio de Bernoulli. El aire insuflado en el tubo ha de escapar a través del pequeño resquicio circular entre el extremo del tubo y el cartón apretado contra él. Este paso es mucho más estrecho que el tubo mismo, de modo que la presión del aire es mucho menor que la del aire atmosférico. Así, la presión del aire exterior empuja al cartón contra el extremo del tubo.

El efecto de Bernoulli explica también las fuerzas que sostienen a las alas de un aeroplano que vuela. El perfil de las alas es tal que la distancia de su borde delantero al borde posterior es mayor cuando el aire se mueve sobre lo alto de las alas que más Bien que por debajo. En consecuencia, las masas de aire que se mueven sobre el ala tienen mayor velocidad y, de acuerdo con Bernoulli, ejercen

una presión menor que las masas de aire que se mueven bajo las alas. La diferencia entre estas dos presiones explica la elevación del aeroplano.

5. Óptica

Pero hemos de acabar aquí la exposición de la mecánica de Newton para disponer de algún espacio para la exposición de su óptica. En esta materia, las principales contribuciones de Newton consisten en los estudios sobre los colores y la prueba fundamental de que la luz blanca es de hecho una mezcla de rayos de diferentes colores, desde el rojo al violeta. Los trabajos de Newton en óptica precedieron a su trabajo fundamental en la mecánica descrito en sus *Principia.* Cuando tenía veintitrés años, compró un prisma de cristal "para experimentar los fenómenos de los colores" y probablemente todos sus descubrimientos fundamentales en este campo se remontan a este período de su vida. Pero un día de febrero de 1692 dejó una vela encendida en su cuarto mientras estaba en la capilla y el fuego que se produjo por accidente destruyó sus papeles, entre ellos una gran obra sobre óptica que contenía los experimentos e investigaciones de veinte años. Por esta razón, la primera edición de la Óptica de Newton no apareció hasta 1704 y se puede preguntar si este retraso se debe efectivamente al incendio y no a la resistencia de Newton a publicar sus ideas frente a la oposición de su pertinaz antagonista Robert Hooke, que murió precisamente un año antes de que Newton enviara a la imprenta su *Óptica o Tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz.* Al principio del libro describe un sencillo experimento que prueba que la luz de diferentes colores tiene diferente *refrangilidad.*

Para probarlo, tomó un gran trozo de cartón, una mitad pintada de rojo vivo y la otra de azul, y colocándolo cerca de la ventana, lo miró a través de un prisma de cristal. Según las propias palabras de Newton, "*observó que si el ángulo de refracción del prisma giraba hacia arriba, de suerte que el papel parecía que se elevaba por virtud de la refracción, su mitad azul será elevada por la refracción más que la mitad roja. Pero si se hace girar hacia abajo el ángulo de refracción del prisma de modo que el papel parece bajar por la refracción, su mitad azul descenderá más que la mitad roja.*" Sobre la base de este experimento dedujo que la luz azul sufre una refracción mayor que la roja y concluyó que una lente debe

concentrar los rayos azules y rojos en focos a diferentes distancias de ella. Para probar esta conclusión tomó un trozo de papel, pintado de azul en una mitad y de rojo en la otra, iluminado por una vela ("*porque el experimento fue realizado por la noche*"), y empleando una lente, trató de obtener una clara imagen sobre un trozo de papel. Para juzgar la claridad de la imagen había tendido a su través varios hilos negros. Conforme a lo que esperaba, no pudo enfocar simultáneamente las dos partes del papel. "*Con toda diligencia observé los lugares donde las imágenes de las mitades azul y roja aparecían más distintas y encontré que donde la mitad roja del papel aparecía distinta y clara, la mitad azul aparecía confusa, de modo que los hilos negros apenas podían ser vistos; y, por el contrario, donde la mitad azul aparecía más distinta, la mitad roja aparecía confusa, de modo que las líneas negras sobre ella eran apenas visibles*". Y como esperaba, la imagen de la parte azul del papel se vela claramente a una distancia más corta que la distancia a que la parte roja se vela claramente.

El experimento siguiente fue ver lo que ocurría cuando la luz blanca del Sol pasaba a través de un prisma. Después de hacer un pequeño orificio en la contramadera de la ventana, colocó un prisma en la trayectoria del angosto rayo de luz que pasaba a su través y una pantalla blanca a cierta distancia. En lugar de una imagen redonda del Sol sobre la pantalla, como en la cámara oscura, como ocurriría sin el prisma, observó una imagen alargada que mostraba un tinte ligeramente azulado en su parte superior y ligeramente rojo en la inferior, Este hecho le inspiró la idea de que la luz blanca del Sol está compuesta de rayos de diferentes colores: desde los rayos azules más refrangibles a los rojos menos refrangibles. Si era así, la imagen alargada formada en la pantalla estaría formada por muchas imágenes sobrepuestas del Sol en diferentes colores y únicamente las dos posiciones extremas serían azul y rojo puros. Para eliminar la superposición de las imágenes del Sol en la pantalla introdujo en el rayo de luz una lente que concentraba la imagen del pequeño agujero de la ventana sobre la pantalla y quedó satisfecho al observar una banda vertical de colores brillantes: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul y violeta, con todos los matices intermedios. Este fue el primer "espectroscopio" y la primera prueba de que la luz blanca está compuesta de rayos de diferentes colores que poseen distinta refrangibilidad.

Para el lector moderno los experimentos de Newton con el prisma pueden parecer infantiles porque, en efecto, todos los niños pueden realizarlos fácilmente hoy. Pero la cosa era muy diferente en aquel tiempo cuando se creía generalmente que el colorido de la luz blanca que pasa a través de los grandes ventanales estañados de cristal de las viejas catedrales es algo semejante al colorido de la ropa blanca que se sumerge en una solución de diferentes tintes. Ahora sabemos que la retina del ojo humano contiene tres clases de células nerviosas sensibles al color: las que responden a la luz roja, a la luz verde y a la luz azul. Cuando todos los colores del espectro están presentes en la misma proporción, como ocurre en la luz solar bajo la cual se ha desarrollado el órgano de la visión durante cientos de millones de años de la evolución orgánica, tenemos la sensación de la luz "ordinaria" o, como la llamamos "blanca". Cuando solamente una parte del espectro está presente tenemos la sensación de los diferentes colores.

Una de las aplicaciones importantes del descubrimiento de Newton de que los rayos de los diferentes colores tienen diferente refrangibilidad fue su teoría del arco iris. El bello despliegue de colores aparece en el cielo cuando el Sol brilla en un lado de él mientras el opuesto está cubierto de pesadas nubes de lluvia. Según la explicación de Newton lo que vemos en este caso son efectivamente rayos de Sol reflejados por las diminutas gotas de lluvia de las nubes o que caen con la lluvia. Lo que ocurre realmente es que los rayos de luz blanca procedentes del Sol inciden sobre las gotas de agua y son refractados al pasar a su través. Después se produce una reflexión interior y por la segunda refracción en su trayectoria salen de la gota. El resultado es que los rayos de diferente color se despliegan a su salida de la gota y los ojos del observador situado en el suelo con su espalda vuelta al Sol observa los diferentes colores procedentes de diferentes direcciones en el cielo. La existencia de varios arcos iris concéntricos se explica suponiendo que, en lugar de ser reflejados una vez dentro de las gotas de lluvia, los rayos de luz procedentes del Sol se reflejan varias veces. Debemos mencionar también los llamados "halos", arcos incoloros que se observan a veces en torno al Sol y especialmente en torno a la Luna. Al contrario que en el arco iris, se deben a la reflexión (no a la refracción) de los rayos de luz en los pequeños cristales de hielo que forman las nubes altas conocidas en meteorología como *cirros.*

Después de haber demostrado que la luz de diferentes colores tiene diferente refrangibilidad, Newton dedujo erróneamente que las lentes tienen un defecto intrínseco para formar imágenes claras de los objetos puesto que los rayos de los diferentes colores no pueden ser concentrados en el foco a la misma distancia de la lente. Esto le llevó a la decisión de que los telescopios que emplean lentes de cristal, como el construido por Galileo, no pueden ser perfeccionados más y debían ser sustituidos por el telescopio basado en la reflexión de la luz que es independiente del color. Por esta razón, en el año 1672 construyó un telescopio de reflexión (o simplemente "reflector"). Consiste en un espejo parabólico M, en el que se forma la imagen de un objeto celeste en algún punto O dentro del tubo. Antes de que los rayos luminosos lleguen al foco en O son reflejados por un pequeño espejo M', situado en el eje del tubo y son desviados al punto O' fuera del tubo donde la imagen puede ser observada. El error de Newton en este caso resultaba de su creencia de que los diferentes materiales refractan los diferentes colores de manera similar. Sólo después de su muerte se vio que esta suposición no era correcta y que es realmente posible concentrar la luz roja y la luz azul en el mismo punto empleando lentes compuestas hechas con diferentes clases de cristal (vidrio corona, flint glass, etc.). Sin embargo, los telescopios de reflexión tienen otras muchas ventajas prácticas, y de hecho los telescopios más potentes hoy (el de 100 pulgadas del Monte Wilson y el de 200 pulgadas del Monte Palomar) son reflectores.

Otro curioso descubrimiento de Newton fue los llamados "anillos de Newton" que aparecen en torno al punto de contacto cuando una lente convexa se coloca sobre una superficie plana de cristal. Newton describe su trabajo con las siguientes palabras:

Ha sido observado por otros que sustancias transparentes como cristal, agua, gire, etc., cuando son muy delgadas por haber sido convertidas en ampollas o en otro caso en láminas, exhiben diversos colores, según su delgadez, aunque cuando son muy delgadas aparecen muy claros e incoloros. Al principio de este libro me abstuve de tratar sobre estos colores, porque me parecen de una consideración más difícil y no era necesario para establecer las propiedades de la luz allí expresadas. Pero como pueden conducir a descubrimientos posteriores para completar la teoría

de la luz, especialmente en cuanto a la constitución de las partes de los cuerpos naturales cuyos colores o transparencia dependen de ella, he aquí una explicación...

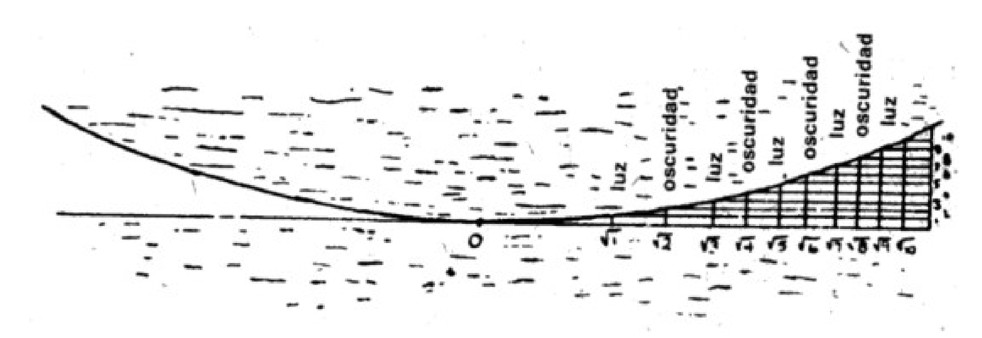


Figura 16. Formación de los anillos de Newton.

Tomo dos objetivos: uno, una lente plano-convexa para un telescopio de catorce pies y el otro una gran lente doble-convexa para un telescopio de cincuenta pies; y sobre ésta, pongo la otra con su parte plana hacia abajo. Los aprieto y junto lentamente hasta hacer que los colores surjan en medio de los círculos y después levanto lentamente la lente superior separándola de la inferior para que los colores vayan desvaneciéndose sucesivamente en el mismo lugar. El color, que al unir los cristales surgió el último en el centro de los demás colores, apareció primero como un círculo de un color casi uniforme desde la circunferencia al centro y al continuar juntando más los cristales se extendió cada vez más hasta que un nuevo color apareció en su centro y por tanto se convirtió en un anillo que circunda al nuevo color. Si se juntan aún más las lentes, el diámetro de este anillo aumenta y la anchura de la órbita o perímetro decrece hasta que aparece un nuevo color en el centro del último. Y así hasta que un tercero, un cuarto, un quinto y otros colores sucesivos van apareciendo y se convierten en anillos que circundan al color más interior, el último de los cuales es una mancha negra. Y, por el contrario, separando el cristal superior del inferior, el diámetro de los anillos disminuye hasta que sus colores van alcanzando el centro y entonces al ir siendo de una considerable anchura, pude discernir más fácilmente que antes sus especies. Y por este medio observé su sucesión y cantidad como sigue:

Primero, a la mancha central trasparente producida por el contacto de las lentes, siguieron azul, blanco, amarillo y rojo. El azul era tan pequeño en cantidad que no lo pude discernir en los círculos producidos por el prisma ni pude distinguir ningún

violeta en él, pero el amarillo y el rojo eran muy copiosos y parecían casi tan extensos como el blanco y cuatro o cinco vetes más que el azul. El siguiente circuito en el orden de los colores circuyendo inmediatamente estos eran violeta, azul, verde, amarillo y rojo, todos ellos copiosos y vívidos, excepto el verde que era poco en cantidad y parecía mucho más apagado y diluido que los demás. De los otros cuatro, el violeta era el menos extenso y el azul menos que el amarillo o el rojo. El tercer circuito u orden era púrpura, azul. verde, amarillo y rojo; el color purpúreo parecía más rojizo que el violeta en el circuito anterior, y el verde era mucho más acusado al ser tan vivo y copioso como cualquiera de los colores, excepto el amarillo, pero el rojo comenzaba a hacerse más apagado, tendiendo mucho hacia el púrpura. Después de este seguía el cuarto circuito de verde y rojo. El verde era muy copioso y vivaz, tendiendo por un lado al azul y por el otro al amarillo. Pero en este cuarto circuito no había violeta, azul ni amarillo y el rojo era muy imperfecto y sucio. También los colores siguientes eran cada vez más imperfectos y diluidos, hasta que después de tres o cuatro revoluciones terminaron en la perfecta blancura.

Al medir el radio de los seis primeros anillos (en sus partes más brillantes), Newton vio que sus cuadrados forman la progresión aritmética de los números impares: 1, 3, 5, 7, 9, 11. Por otra parte, los cuadrados de los radios de los anillos oscuros forman una progresión de números pares: 2, 4, 6, 8, 10, 12. La situación se muestra en la Figura 16, que representa la sección transversal de las superficies convexa y plana de cristal cerca del punto de contacto. En el eje horizontal están señaladas las distancias a las raíces cuadradas de los números enteros: $\sqrt{1} = 1$; $\sqrt{2} = 1{,}41$; $\sqrt{3} = 1{,}73$; $\sqrt{4} = 2$, $\sqrt{5} = 2{,}24$, etc., en las cuales Newton observó los máximos y mínimos alternativos de luz. Observamos esta figura y se puede probar también matemáticamente que las distancias verticales entre las dos superficies de cristal aumenta en una sencilla progresión aritmética: 1, 2, 3, 4, 5, 6, etc. Conociendo el radio de la lente convexa, Newton pudo calcular fácilmente el espesor de la capa de aire en los lugares donde aparecen los anillos brillantes y oscuros. Newton dice:

...la 1/89.000 parte de una pulgada es el espesor del aire en la parte más oscura del primer anillo formado por rayos perpendiculares; y la mitad de este espesor del aire en las partes más luminosas de todos los anillos más brillantes, a saber:

1/178.000, 3/178.000, 5/178 000, 7/178.000 ' etcétera, sus *medias* aritméticas: 2/178 000, 4/178.000, 6/178.000, etc. que es su espesor en las partes oscuras de todos los oscuros.

Contrariamente a la aserción antes citada de Newton de que los colores de arco iris de las capas delgadas "*no son necesarios para establecer las propiedades de la luz*", los anillos de Newton representan una de las mejores pruebas de la naturaleza ondulatoria de la luz, una verdad que Newton no guiso reconocer hasta su muerte. Los anillos son el resultado de la llamada "interferencia" entre dos rayos de luz reflejados por dos superficies de cristal separadas a distancias variables. Cuando un estrecho rayo de luz cae desde arriba sobre la frontera entre el cristal de la lente superior y la capa de aire entre las dos lentes, una parte es reflejada mientras que el resto entra en el aire. Entonces se produce una segunda reflexión parcial cuando el rayo penetra en el cristal de la lente inferior y los dos rayos reflejados se mueven juntos hacia arriba hasta los ojos del observador. Lo que ocurre en este caso queda ilustrado gráficamente en la Figura 17.

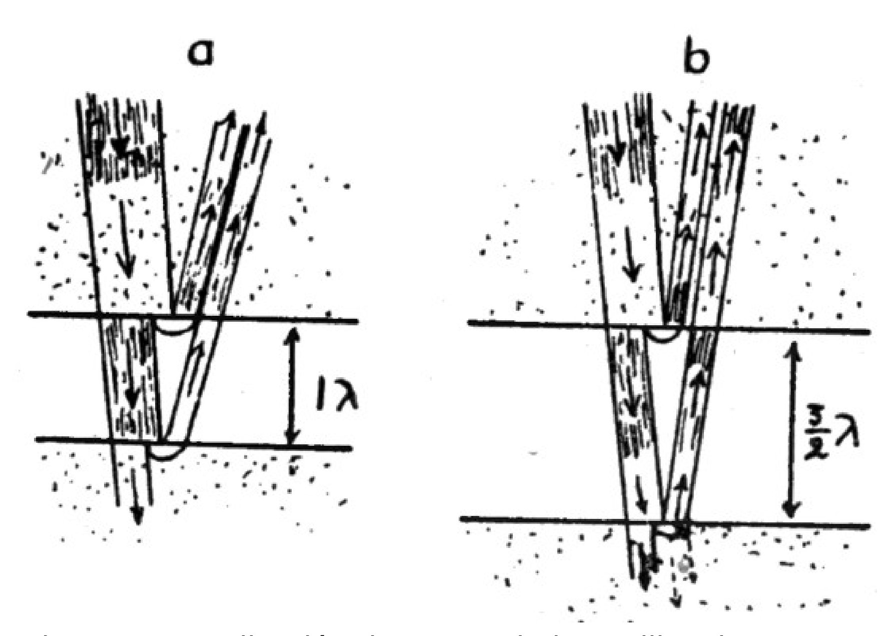


Figura 17. Explicación de Young de los anillos de Newton.

Por las conveniencias del dibujo, las ondas se representan mediante tronos oscuros y blancos que corresponden a sus crestas y depresiones. Asimismo, los rayos de luz no están dibujados exactamente perpendiculares a la cara intermedia para evitar

que se sobrepongan; este es el caso en cierto modo en la observación efectiva, puesto que la fuente de luz y la cabeza del observador no pueden estar en la misma línea. En la Figura 17 a vemos lo que ocurre cuando el espesor de la capa de aire es igual a la mitad de la longitud de onda de la luz incidente (en la figura la longitud de onda se representa con la longitud total de un trozo blanco y otro oscuro). En este caso, la onda reflejada por la superficie de la lente inferior se une a la onda reflejada por la superior de tal manera que la cresta de la primera onda coincide con las depresiones de la segunda, y viceversa. Si las dos ondas son de la misma intensidad se anulan completamente una a otra; en caso contrario, la intensidad quedará considerablemente reducida. En la Figura 17 b tenemos el caso de que el espesor del aire es igual a la mitad (ó 2/4) de la longitud de onda. Los dos rayos reflejados se propagan entonces cresta con cresta, depresión con depresión, y tenemos aumentada la intensidad. En la Figura 17 b la capa de aire es 3/4 de la longitud de onda y la situación es idéntica a la de la Figura 17 a. Para mayores espesores de la capa de aire, tendremos alternativamente luz y sombra para cada cambio en que el espesor aumente por 1/4 de la longitud de onda. En el caso del experimento de Newton, el espesor aumenta continuamente conforme se separa del punto de contacto, de suerte que se observarán alternativamente anillos oscuros y brillantes. Como la luz de los diferentes colores corresponde a las diferentes longitudes de onda, los radios de los anillos de diferentes colores serán algo diferentes y observaremos los anillos arco irisados como los vio Newton. Tomando las cifras antes citadas de Newton para los espesores del aire encontramos que la longitud de la onda de luz que produciría los anillos de aquellos radios debe ser 4/178000 pulgadas ó 0,58 x 10^4 cm. Como ahora sabemos, ésta es precisamente la longitud de onda de la luz amarilla, la parte más brillante del espectro visible.

Pero Newton se opuso violentamente a la teoría ondulatoria de la luz, principalmente porque no veía cómo con ella se podría explicar la propagación rectilínea de los rayos luminosos. Insistía en que la luz tiene que ser una corriente de partículas que se precipitan a gran velocidad a través del espacio. Así, para explicar la aparición de los anillos de interferencia inventó una complicada teoría de *"fits* (espromos) de fácil reflexión y transmisión", según la cual:

...todo rayo de luz a su paso a través de una sustancia refringente es puesto en un cierto estado o constitución transitoria, que durante el avance del rayo se repite a intervalos iguales y hace que el rayo a cada repetición sea fácilmente transmisible a través de la siguiente superficie refringente y entre las repeticiones sea fácilmente reflejada por ella.

La "longitud de *fit"* corresponde evidentemente a lo que ahora llamamos "longitud de onda", y concluía que esta "longitud de *fit"* es mayor para la luz roja y menor para la azul. Pero escribe:

Qué clase de acción o disposición es esta, si consiste en un movimiento circular o vibratorio del rayo o del medio o alguna otra cosa, no lo investigo aquí.

El antagonista de Newton en las discusiones acerca de la naturaleza de la luz, y el hombre cuya teoría triunfó posteriormente fue el físico holandés Christian Huygens, trece años más viejo. Las razones por las que Huygens prefería considerar la luz como ondas que se propagan a través de algún medio universal que llena el espacio más bien que como un rayo de partículas que se mueven rápidamente se encuentran resumidas, de la mejor manera, en un pasaje de su libro *Traité de la lumière,* publicado en 1690:

6. Sobre la propagación de la luz

Los procedimientos de prueba en la óptica, lo mismo que en otras ciencias en que se aplica la Geometria a la materia, están balados en verdades derivadas de la experiencia; por ejemplo, el hecho de que los rayos luminosos se propagan en línea recta, que el ángulo de reflexión es igual al de incidencia, y que la refracción obedece a la regia de los senos, tan bien conocida hoy y no menos cierta que las otras.

La mayoría de los que han escrito sobre las diferentes partes de la óptica se han contentado con tomar estas verdades como seguras. Algunos, más investigadores, se han esforzado en descubrir sus orígenes y causas, puesto que los consideraban como efectos maravillosos inherentes de la naturaleza. Sin embargo, como las opiniones ofrecidas, aunque ingeniosas, no son tales

que gentes más inteligentes no necesitarían otras explicaciones de un género más satisfactorio, quiero presentar aquí mis pensamientos sobre la materia, de suerte que, poniendo toda mi habilidad, pueda contribuir a la solución de esta parte de la ciencia que no sin razón se considera como una de las más difíciles. Reconozco mi gran deuda con todos los que primeramente comenzaron a disipar la extraña oscuridad que rodea estas cosas y que suscitaron la esperanza de que podían ser, no obstante, explicadas racionalmente. Pero, por otra parte, no estoy poco sorprendido de que muy a menudo han considerado como ciertas y probadas conclusiones que tan sólo son demasiado endebles; en mi opinión, ciertos conocimientos no han ofrecido una explicación satisfactoria, ni siquiera del primer y más importante fenómeno de la luz, a saber, por qué se propaga precisamente en línea recta y cómo rayos de luz que llegan de direcciones infinitamente diferentes se cruzan sin estorbarse unos a otros.

Por esta razón, intentaré en este libro, de acuerdo con los principios sostenidos por la filosofía contemporánea, dar razones más claras y probables de las propiedades: primero, de la propagación rectilínea de la luz, y, segundo, de la reflexión de la luz cuando encuentra otros cuerpos. Después explicaré aquellos fenómenos de los rayos que, al atravesar clases diferentes de cuerpos transparentes, sufren la llamada refracción, y en esto trataré también de los efectos de la refracción en el aire producidos por las diferencias en la densidad de la atmósfera.

Continuaré investigando la extraña refracción de la luz de un cristal especial traído de Islandia. Finalmente trataré de las diferentes formas de los cuerpos transparentes y reflectantes, por medio de los cuales se hace converger los rayos en un punto o son desviados en las direcciones más diferentes. En esto veremos qué fácilmente nuestra nueva teoría lleva al descubrimiento, no sólo de las elipses, hipérbolas y otras curvas que Descartes- ha sugerido ingeniosamente para este efecto, sino también de aquellas figuras que forman la superficie de un cristal, cuando la otra superficie se sabe que es esférica, plana o de cualquier otra forma...

Ahora bien, puesto que, de acuerdo con esta filosofía, se tiene por cierto que el sentido de la vista es estimulado únicamente por la impresión de un cierto movimiento de materia que actúa sobre los nervios en el fondo de nuestros ojos, esto es una razón más para creer que la luz consiste en un movimiento de la materia entre nosotros y el cuerpo luminoso. Si además tenemos en cuenta y consideramos la extraordinaria velocidad con que la luz se esparce en todas direcciones y también el hecho de que procediendo, como lo hace, de direcciones muy diferentes y en verdad opuestas, los rayos se interpenetran sin obstruirse unos a otros, entonces podemos comprender que siempre que vemos un objeto luminoso, esto no puede ser debido a la transmisión de la materia que nos llega del objeto, como por ejemplo un proyectil o una flecha que vuela en el aire, porque esto es una patente contradicción de las dos propiedades de la luz y en particular de la segunda. Así pues, debe propagarse de otro modo y precisamente nuestro conocimiento de la propagación del sonido en el aire puede llevarnos a comprender cuál es este modo.

Sabemos que por medio del aire, que es un cuerpo invisible e impalpable, el sonido se propaga a través de todo el espacio que rodea su fuente por un movimiento que avanza gradualmente de una partícula del aire a la siguiente, y como la propagación de este movimiento se realiza con la misma velocidad en todas direcciones deben formarse superficies esféricas que se extienden cada vez más para, al fin, alcanzar nuestros oídos. Ahora bien, no hay duda de que la luz también nos llega de los cuerpos luminosos por medio de algún movimiento que se comunica a la materia intermedia, porque ya hemos visto que no puede ocurrir por virtud de la traslación de un cuerpo que puede llegar a nosotros desde allí. Si ahora, como investigaremos en seguida, la luz necesita tiempo para su recorrido, se sigue que este movimiento comunicado a la materia debe ser gradual y que, como el sonido, debe propagarse en superficies esféricas u ondas; las llamo ondas a causa de su analogía con las que vemos formarse en el agua cuando arrojamos en ella una piedra y a causa de que nos permiten observar una gradual propagación semejante en círculos, aunque son debidos a una causa diferente y únicamente se forman en una superficie plana...

Considerando la propagación de ondas, sea en la superficie del agua, en el aire, o en el misterioso "*éter cósmico*", vehículo de las ondas de luz, Huygens basaba sus argumentos en un sencillo principio que ahora lleva su nombre. Supongamos, para emplear el caso más familiar y obvio, que arrojamos una piedra sobre la quieta superficie de un estanque. Vemos una onda circular o más bien una serie de ondas que se extienden alrededor del punto en que la piedra hirió la superficie. Dada la posición de la onda en un cierto momento, ¿cómo averiguar su posición poco tiempo después? Según el principio de Huygens, *cada punto del frente de una onda que se propaga puede ser considerado como fuente de una nueva onda u ondita y la nueva posición del frente de la onda es el evolvente común de todas estas pequeñas ondas emitidas desde todos los puntos del frente de onda en su posición anterior.*

La aplicación más brillante del principio de Huygens fue su explicación de la refracción de la luz, mostrada en la Figura 18.

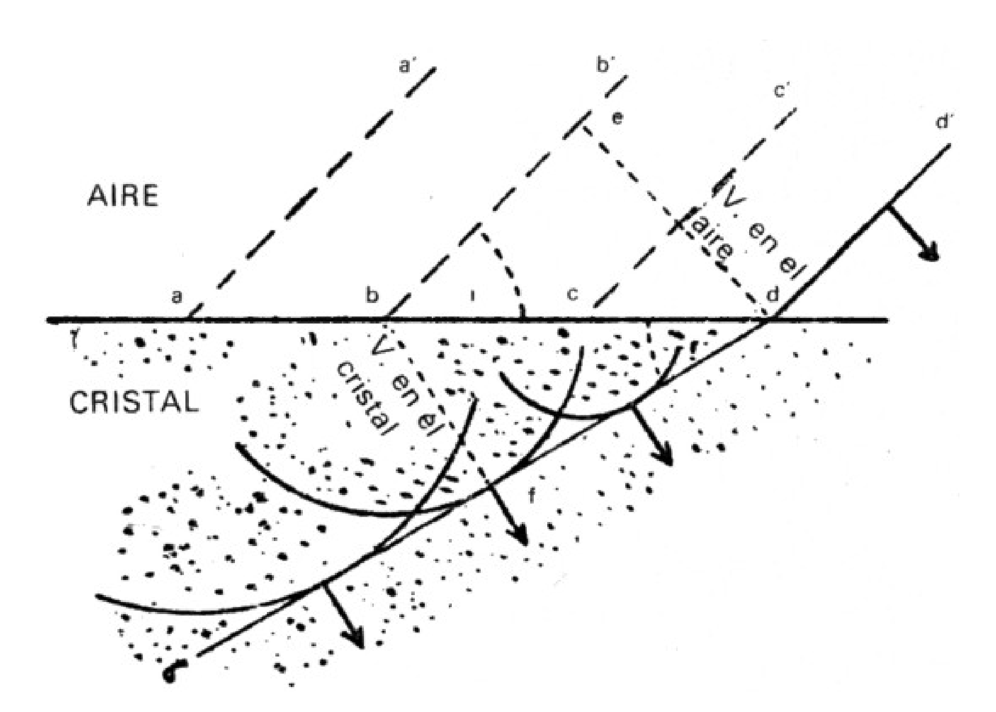


Figura 18. Explicación de Huygens de la refracción de la luz.

Supongamos un frente de onda plana que cae desde el lado izquierdo superior sobre la cara intermedia entre el aire y el cristal (u otros dos medios cualesquiera).

Cuando este frente de onda está en la posición *aa*' y toca la cara intermedia en el punto *a*, una pequeña onda esférica comienza a propagarse en el cristal desde este punto. Como el frente de la onda avanza en el aire, otras pequeñas ondas son emitidas consecutivamente desde los puntos *b, c,* etc. El dibujo corresponde al momento en que el frente de onda que avanza está en la posición *dd'* y la pequeña onda en el cristal está comenzando desde el punto *d*. Para encontrar la posición del frente de onda en el cristal tenemos que tratar una línea que envuelve a todas las pequeñas ondas, la cual, en este caso, será una línea recta. Si, como se supone en el dibujo, la velocidad de la luz en el cristal es menor que en el aire (es decir, si los radios de las pequeñas ondas esféricas son menores que las distancias entre las sucesivas posiciones del frente de la onda en el aire) el frente de la onda en el cristal se inclinará hacia abajo y los rayos refractados se acercarán más a la vertical que los incidentes; esto es lo que sucede efectivamente cuando la luz pasa del aire al cristal. Si la velocidad de la luz en el cristal fuera mayor que en el aire, se produciría la situación contraria. Para encontrar la relación entre el ángulo de incidencia *i* y el ángulo de refracción *r*[14] consideremos dos triángulos rectángulos *bde y bdf,* que tienen una hipotenusa común. Conforme a la definición del seno:

$$sen\, i = \frac{ed}{bd};sen\, r = \frac{bf}{bd}$$

Dividiendo la primera ecuación por la segunda tenemos:

$$sen\, i = \frac{ed}{bd}\ \frac{V_{aire}}{V_{cristal}}$$

donde V_{aire} y $V_{cristal}$ son la velocidad de la luz en los dos medios. Esta es exactamente la ley de Snell, con la corrección de que la razón de los dos senos, conocida como *índice de refracción,* es igual a la razón de las velocidades de la luz en los dos medios. De aquí se sigue que la velocidad de la luz en un medio más denso (como el cristal) es menor que en un medio menos denso (como el aire).

[14] Ambos ángulos pueden ser definidos, bien como los ángulos entre la dirección de los rayos y la perpendicular al límite entre los dos medios o como los ángulos entre los frentes de onda y su límite.

Es interesante advertir que la teoría corpuscular de la luz de Newton nos llevaría a conclusiones exactamente contrarias. En efecto, para explicar la curvatura de los rayos que pasan del aire al agua sobre la base de la teoría corpuscular sería necesario suponer que hay allí alguna fuerza perpendicular a la cara intermedia que empuja las partículas de la luz cuando la cruzan. En este caso, claro está, la velocidad en el cristal seria mayor que en el aire.

7. El triunfo de la teoría ondulatoria de la luz

A pesar de las evidentes ventajas de la teoría ondulatoria de Huygens sobre la teoría corpuscular de Newton, no fue aceptada durante un período muy largo de tiempo. Esto se debió en parte a la gran autoridad de Newton entre sus contemporáneos y particularmente a la poca habilidad de Huygens en desarrollar sus ideas con la suficiente precisión matemática para hacerlas invulnerables a todas las objeciones. Así, la cuestión sobre la naturaleza de la luz quedó pendiente durante un siglo hasta la aparición en 1800 de un trabajo del físico inglés Thomas Young, titulado "*Esbozos de experimentos e investigaciones respecto a la luz y el sonido*". En él, Young explica el fenómeno de los anillos de Newton sobre la base de la naturaleza ondulatoria de la luz y describe su propio experimento con el cual se puede demostrar del modo más elemental la interferencia de dos rayos de luz. Para este experimento (Figura 19), hizo dos agujeros muy próximos en la pantalla que cubría la ventana de un cuarto oscuro.

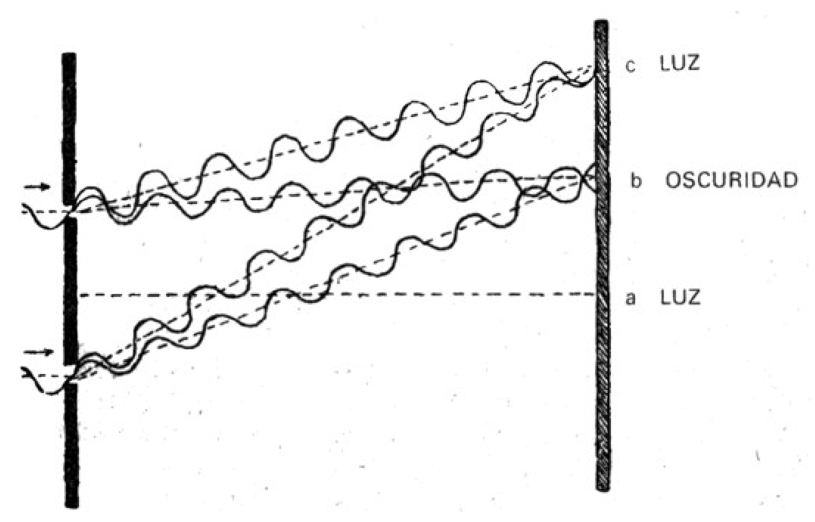


Figura 19. Experimento de interferencia por Young.

Cuando los agujeros eran relativamente grandes, la luz del Sol pasaba a su través formando dos manchas de luz en otra pantalla situada a alguna distancia de ellos.

Pero cuando los agujeros eran muy pequeños, los rayos luminosos que pasaban a su través se propagaban de acuerdo con el principio de Huygens y las dos manchas se extendían y parcialmente se sobreponían una a otra. En la región donde la pantalla recibía la luz de ambos agujeros, Young observó una serie de bandas finas arco irisadas separadas por intervalos oscuros, absolutamente idénticas a los anillos de Newton. Cuando los agujeros de la pantalla estaban separados 1 milímetro y la otra pantalla a 1 metro de distancia, las bandas eran de 0,6 de anchura. La explicación de este fenómeno se funda en la interferencia de las ondas luminosas, lo mismo exactamente que en el caso de los anillos de Newton. El punto a en la pantalla que está situado exactamente a la mitad entre los centros de las dos imágenes equidista de los dos agujeros O y O', y las ondas llegan allí "en fase", es decir, coincidiendo cresta con cresta y depresión con depresión. El movimiento de las dos ondas se suma y se produce un aumento de la iluminación. Lo mismo ocurre en el punto *c,* cuyas distancias de O y O' difieren en una longitud de onda. Por otra parte, en los puntos *b y d,* para los cuales *bO-b'O y dO-d'O* difieren en media longitud de onda y por 1 1/2 longitud de onda respectivamente, las ondas de luz que llegan están "fuera de fase" y las crestas se sobreponen a las depresiones. Aquí se observan bandas oscuras.

Los trabajos de Thomas Young y su gran contemporáneo, el francés Augustin Jean Fresnel, establecieron firmemente la validez de la teoría ondulatoria de la luz y de este modo Huygens ganó después de muerto la disputa de toda su vida con Newton.

8. Un cristal de Islandia

Otro problema tratado pero no resuelto por Newton y Huygens fue el de la polarización de la luz. En 1669, el filósofo danés Erasmus Bartholin descubrió que los cristales de un mineral transparente llamado espato de Islandia tienen la peculiar propiedad de dividir los rayos que pasan a su través en una cierta dirección en dos rayos separados. Si el cristal gira en torno a la dirección del rayo incidente, uno de los dos rayos que resultan, llamado el *rayo ordinario,* queda estacionario, mientras que el otro, el *rayo extraordinario,* se mueve en torno cuando gira el cristal. Huygens interpretó este fenómeno, suponiendo que una onda luminosa que

penetra en el cristal de espato de Islandia (y de algunos otros cristales) se divide en dos ondas: una que se propaga con la misma velocidad en todas direcciones a través del cristal y otra cuya velocidad depende de su dirección respecto a la línea del eje del cristal. La idea de Huygens acerca de cómo esta diferencia en la propagación de las velocidades lleva a la formación de dos rayos se muestra en la Figura 20 y está fundada, naturalmente, en el principio de Huygens.

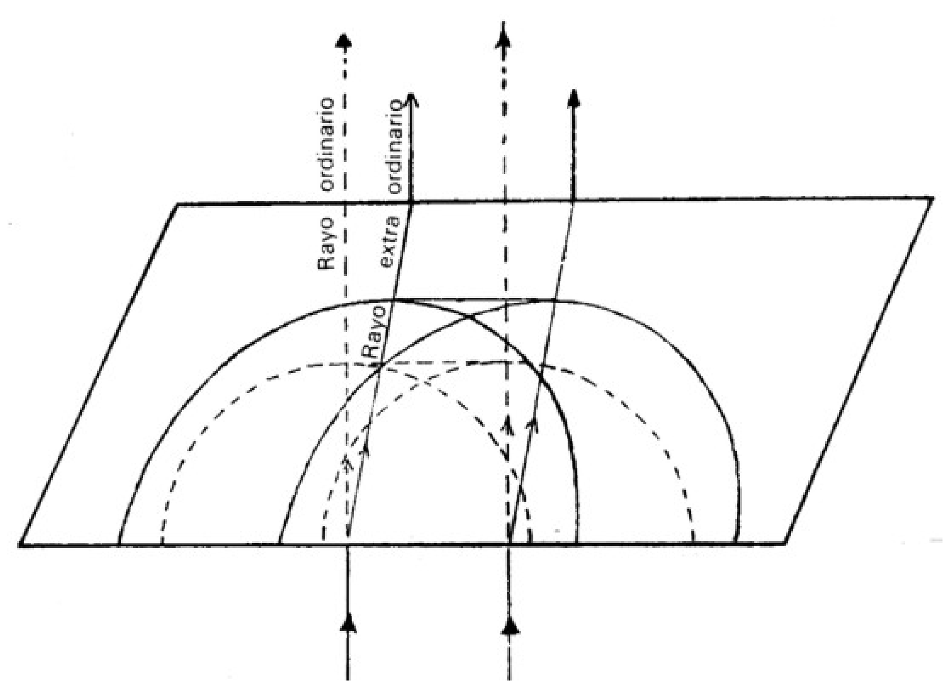


Figura 20. Explicación de Huygens de la doble refracción.

Cuando el rayo luminoso cae verticalmente sobre la superficie del espato de Islandia, se forman dos series de pequeñas ondas, las esféricas y las elipsoidales. Las esféricas dan lugar a un frente de onda que 'es continuo en la misma dirección del rayo incidente mientras las elipsoidales hacen que el frente de onda resultante se desvíe de continuo lateralmente, formando de este modo el rayo extraordinario. Después de que ambos rayos salen del cristal, únicamente se forman en el aire ondas esféricas, y los dos rayos corren paralelamente. Aunque esta explicación dada por Huygens es completamente correcta, no pudo explicar por qué las ondas de luz se propagan en el cristal de dos maneras diferentes. Esto es porque creía que las oscilaciones de las ondas de luz se realizan en la dirección de su propagación (vibración lineal) como en el caso del sonido, y en tal caso no habría ninguna

diferencia si se hace girar al cristal en torno de la dirección del rayo incidente. Por su parte, Newton no creía en las ondas y pequeñas ondas de Huygens y buscaba la explicación de este fenómeno (conocido como "*doble refracción*"), suponiendo que las partículas que forman los rayos ordinario y extraordinario se orientan de modo diferente en la dirección perpendicular al rayo. En la segunda edición de su *óptica* compara la diferencia entre los dos rayos con la diferencia entre dos largas varillas, una de sección transversal circular y otra con sección rectangular. Si se hace girar la primera varilla en torno a su eje no se observa ninguna diferencia, lo que evidentemente no es el caso de la segunda varilla. "*Todo rayo de luz —escribe Newton— tiene, por tanto, dos lados opuestos, dotados originariamente de la propiedad de la cual depende la refracción insólita y el otro dos lados opuestos que carecen de esa propiedad*". Dándose cuenta de que los rayos de luz deben tener ciertas propiedades transversales (es decir, perpendiculares a la dirección de propagación) Newton no pudo ver lo que podía ser. Sólo mucho más tarde, gracias a los trabajos del físico francés Etienne Malus (1775-1812) y otros, las ideas de Huygens y Newton referentes a esta cuestión fueron resumidas en un único punto de vista. No hay duda de que la luz no es más que propagación de ondas a través del espacio, pero las vibraciones del medio no se producen en la dirección de la propagación, como Huygens pensaba, sino perpendicularmente a ella. La diferencia entre el rayo ordinario y el extraordinario en el espato de Islandia es que, en el primer caso, las vibraciones se realizan en el plano que pasa a través del rayo y del eje del cristal mientras en el otro caso son perpendiculares a él.

El descubrimiento de la naturaleza transversal de las vibraciones de la luz no terminó con los apuros de los físicos de la generación siguiente. En efecto, las vibraciones transversales sólo pueden existir en cuerpos sólidos que resisten al corte y al doblamiento. Esto significa que el éter cósmico, el hipotético vehículo de la luz, no era un gas muy rarificado, como Huygens había imaginado, sino ¡un cuerpo sólido! Si el éter que lo penetra todo es sólido ¿cómo pueden los planetas y otros cuerpos celestes moverse a su través sin encontrar prácticamente ninguna resistencia? Y, además, aun si se supone que el éter cósmico es una materia sólida muy ligera y fácilmente comprimible, como el *Styrofoam* empleado actualmente en muchas conexiones, el movimiento de los cuerpos celestes horadaría en él tantos

canales que perdería pronto su propiedad de transportar las ondas luminosas a largas distancias. El enigma estuvo abrumando a los físicos durante muchas generaciones hasta que finalmente le resolvió Albert Einstein, arrojando el éter afuera por las ventanas de las aulas de física.

9. El eclipse de Newton

A la edad de cincuenta años, Newton resolvió abandonar la vida académica y comenzó a buscar una posición que le reportase mejores ingresos. Se le ofreció el cargo de director de la Charterhouse[15] en Londres, pero la oferta no le gustó mucho. En su carta rechazando el cargo escribió:

> *Le agradezco mucho haber sido recordado en Charterhouse pero no veo en ello nada que valga la pena de hacer un esfuerzo: aparte de un coche (que evidentemente se le ofreció), que no me importa, se trata de 200 libras por año con un confinamiento en el aire de Londres y con tal manera de vivir que no me gusta; ni pienso que sería conveniente entrar en tal competencia como sería por una plaza mejor.*

En 1696, a la edad de cincuenta y cuatro años fue nombrado celador y después director de la Casa de la Moneda de Londres y comenzó a hacer dinero, literal y efectivamente. En 1705 fue nombrado caballero y se convirtió en Sir Isaac y recibió otros muchos honores. Pero en los últimos veinticinco años de su vida (murió en 1727 a la edad de ochenta y cinco años) no hizo ningún descubrimiento importante como cuando parecían desbordar del cuerno de la abundancia a sus veinticinco años. Algunos biógrafos lo atribuyen a la ancianidad, alguno dice que fue a causa de que había agotado todas las ideas posibles que podían haber surgido en su época. ¡De todas maneras hizo bastante!

---

[15] Una escuela distinguida para la aristocracia inglesa

Capítulo 4
El calor como energía

Los primeros estudios del fenómeno del calor fueron realizados por el hombre prehistórico de las cavernas que descubrió cómo hacer fuego para estar caliente durante los períodos en que el Sol no le proporcionaba calor suficiente. Su íntima colaboradora, la mujer prehistórica de las cavernas, hizo un importante descubrimiento más: las diferentes sustancias alimenticias mantenidas durante cierto tiempo sobre la llama o en agua hirviendo sabían mucho mejor y eran más digeribles. Las nociones de "caliente" y "frio" son innatas en el hombre lo mismo que en todos los demás seres vivientes, y la temperatura del ambiente se registra y señala en el cerebro por millones de nervios que terminan en la superficie de la piel. Pero la respuesta fisiológica a la temperatura se engaña a menudo y un hombre con los ojos vendados no puede decir si su mano ha sido quemada por un hierro al rojo o congelada por un trozo de hielo seco. En ambos casos, las sensaciones son idénticas a causa de que ambas son la respuesta fisiológica al daño sufrido por los tejidos.

1. Termómetros

El primer instrumento verdaderamente científico para medir la temperatura fue inventado en 1592 por Galileo que empleaba con este propósito un frasco de cristal de cuello muy largo y estrecho medio lleno de agua cobreada y colocado al revés en un tazón de agua cobreada. Con los cambios de temperatura, el aire contenido en el frasco se dilataba o contraía y la columna de agua en el cuello ascendía o descendía. Galileo no se preocupó de introducir una escala de temperaturas de suerte que su aparato debía ser llamado un "termoscopo" más bien que un "termómetro". La modificación del termoscopo de Galileo fue propuesta por Ray en 1631 y consistía simplemente en el invertido frasco de Galileo en el cual el enfriamiento y el calentamiento eran registrados por la expansión del agua.

En el año 1635, el duque Fernando de Toscana, que se interesaba por la ciencia, construyó un termómetro empleando alcohol (que se congela a más baja temperatura que el agua) con el tubo cerrado por su parte superior para que el

alcohol no pudiera evaporarse. Por último, en 1640, los científicos de la Academia Lincei de Italia construyeron un prototipo del termómetro moderno, empleando mercurio y eliminando, al menos parcialmente, el aire de la parte superior del tubo cerrado. Es interesante observar que todo el desarrollo del termómetro exigió medio siglo comparado con los pocos años transcurridos entre el descubrimiento de las ondas electromagnéticas y la construcción del primer radiotelégrafo o entre el descubrimiento de la desintegración del uranio y la primera bomba atómica.

2. Leyes de los gases

Mientras Newton estaba en Cambridge estudiando la luz y la gravedad, otro inglés, Robert Boyle trabajaba en Oxford sobre las propiedades mecánicas y la compresibilidad del aire y otros gases. Al conocer la invención de la plomada de aire por Otto von Guericke, Boyle perfeccionó su propósito y comenzó una serie de experimentos para medir el volumen del aire a distintas presiones, altas y bajas. De su trabajo resultó lo que ahora se llama "ley de Boyle", según la cual *el volumen de usa dada cantidad de cualquier gas a una dada temperatura es inversamente proporcional a la presión a que está sometido.*

Casi cien años después un francés, Joseph Gay-Lussac, estudiando la expansión de los gases cuando se les calienta, encontró otra ley muy importante, según la cual *la presión de un as contenido en un volumen dado aumenta es un 1/273 de su valor inicial por cada grado centígrado de temperatura.* La misma ley había sido descubierta dos años antes por otro francés, Jacques Charles, y por eso se la suele llamar "Ley de Charles".

3. Termómetro de gas y temperatura absoluta

Estas dos leyes indican la sencillez de la estructura interna de los gases, puesto que la compresibilidad y la expansión térmica de sólidos y líquidos está sujeta a leyes más complicadas y depende esencialmente de la naturaleza del material. La sencillez de las leyes que rigen la conducta de los gases independientemente de su naturaleza química hace del "termoscopo" de gas construido por Galileo un instrumento mucho más racional para medir la temperatura que cualquier otro aparato construido después. Líquidos diferentes como agua, alcohol, mercurio, etc.

(lo mismo que los sólidos que pueden ser empleados en la construcción de los termómetros) se dilatan de modo diferente con la elevación de la temperatura; incluso el agua se contrae en lugar de dilatarse cuando la temperatura se eleva desde el punto de congelación unos cuantos grados por encima de éste. Así, pues, si se construyen dos termómetros empleando líquidos diferentes, en ellos se señalan las posiciones de la columna a dos temperaturas diferentes (digamos, el punto de congelación y el de ebullición del agua) y se divide la distancia entre las dos señales en intervalos iguales (100° en el caso de la escala centígrada); estos dos termómetros mostrarán valores algo distintos entre los dos puntos finales. Por otra parte, como todos los gases se dilatan exactamente del mismo modo cuando se les calienta, representan un material mucho más *estándar* para la finalidad de medir la temperatura. Cuando se emplea el termómetro de gas, como el de Galileo, no se necesita especificar si el gas es aire ordinario, hidrógeno, helio u otro cualquiera. La versión moderna del termómetro de gas está fundada en la medida de la presión más bien que en el volumen del gas calentado. Cuando la temperatura aumenta, el gas se dilata y empuja el mercurio del tubo de la izquierda. Levantando el tubo de cristal de la derecha, el gas vuelve a su volumen primitivo y se mide la temperatura por la diferencia *h* entre los dos niveles del mercurio. Después de haber establecido la escala de temperaturas sobre la base del termómetro de gas, se pueden graduar todos los demás termómetros empleando el termómetro de gas como tipo. Empleando el termómetro de gas y comenzando con la presión atmosférica (cuando las dos columnas de mercurio están al mismo nivel) se observa, como antes se ha indicado, que la presión del gas aumenta o disminuye en un 1/273 de su valor primitivo cuando su temperatura se eleva o disminuye en 1° centígrado. Así, si comentamos con 0° centígrados (el punto de congelación del agua) y enfriamos el gas a 273° bajo cero, podemos esperar que la presión del gas se reduzca a cero y el gas estará contraído al volumen cero. El punto en el cual se supone que ocurriría esto se conoce como el *cero absoluto de temperatura* y las temperaturas contadas desde este punto son las *temperaturas absolutas* (T° abs. = 273 + T° centígrados). Naturalmente, los gases enfriados nunca se contraen a un punto matemático en que no tienen volumen y poco antes de alcanzar el cero absoluto se condensan en líquidos que no pueden contraerse mucho más. Sin embargo, el cero absoluto de

temperatura desempeña un papel muy importante en la termofísica, como la temperatura a la que la contracción del gas en un punto matemático ocurriría si las moléculas del gas fueran de un tamaño infinitamente pequeño y no hubiera fuerzas atractivas intermoleculares. (Ambas condiciones están cerca de ser satisfechas por los "gases raros" como el helio, el neón, el argón, etc.)

4. El fluido calor

Aunque se habla del calor desde tiempo inmemorial —demasiado en los países meridionales y no bastante en los septentrionales—, el primer hombre que habló del calor como una definida entidad física, cuya cantidad puede medirse como medimos la cantidad de agua o de petróleo, fue probable-mente un médico escocés, llamado James Black (1728-1799), tan interesado por la física como por la química. Consideraba el calor como un cierto fluido imponderable que llamó "calórico" que podía interpenetrar todos los cuerpos materiales aumentando su temperatura. Al mezclar un volumen de agua hirviendo con otro volumen igual de agua helada observó que la temperatura de la mezcla es exactamente la media entre las dos temperaturas iniciales e interpretó este hecho diciendo que el exceso "calórico" del agua caliente se reparte por igual entre las dos porciones. Definió la unidad de calor como la cantidad necesaria para elevar la temperatura de 1 libra de agua un grado Fahrenheit (en el moderno sistema métrico hablamos de *caloría,* que es la cantidad de calor que eleva la temperatura de un gramo de agua en un grado centígrado). Y concluyó que pesos iguales de diferentes materias calentados a la misma temperatura contienen diferentes cantidades de "calórico" puesto que, en efecto, cuando se mezclan pesos iguales de agua caliente y de mercurio frio se obtiene una temperatura que está mucho más cerca de la temperatura primitiva del agua que de la del mercurio. Así pues, argumentaba: enfriando un grado cierta cantidad de agua se deja libre más calor que el necesario para calentar un grado un peso igual de mercurio. Esto le llevó a la noción de *capacidad calorífica* de las diferentes materias caracterizada por la cantidad de calor necesaria para elevar un grado la temperatura. Otra importante noción introducida por Black fue la de *calor latente,* que es el calor necesario para convertir el hielo en agua helada (ambos a cero grados centígrados) o el agua hirviendo en vapor de agua (ambos a 100 grados

centígrados). Pensaba que añadiendo cierta cantidad del fluido imponderable del calor a un trozo de hielo, éste perdía su estructura convirtiéndose en líquido y que, de modo análogo, añadiendo más calor al agua caliente, ésta perdía su estructura hasta convertirse en vapor.

La analogía entre el calor y un fluido fue desarrollada aun más por un joven francés, Sadi Carnot, que murió en 1832, a la edad de treinta y seis años. Carnot comparaba la máquina de vapor, en la cual el trabajo mecánico está producido por el calor fluyendo de una caldera caliente, con una rueda hidráulica, en la cual el trabajo está producido por agua que cae desde un alto nivel. Esta analogía le llevó a la conclusión de que, exactamente como en el caso de la rueda hidráulica, en que la cantidad de trabajo suministrada por una cierta cantidad de agua aumenta en proporción a la diferencia entre los niveles de agua por encima y por debajo de la rueda la cantidad de energía mecánica que puede ser producida por una máquina de vapor debe ser proporcional a la diferencia de temperaturas entre la caldera donde se origina el vapor y el refrigerador donde se condensa. Creía, sin embargo, que, como en el caso de la rueda hidráulica, la cantidad de calor que llega al refrigerador es igual a la que ha Balido del hervidor y que el trabajo mecánico es originado por una cierta cantidad de "caída" de calor desde la temperatura alta a la región de temperatura baja. Ahora sabemos que esta suposición era errónea y que la máquina de vapor transforma en energía mecánica una parte del calor que fluye a su través y que la cantidad de calor que llega al condensador es menor que la cantidad de calor así transformada.

5. El calor es movimiento

La idea de que el calor es una especie de movimiento interior del cuerpo material, y no una sustancia especial como creyeron Black y otros, se le ocurrió por primera vez a un soldado profesional y fue desarrollada por experimentos realizados en una fábrica de cañones. Benjamin Thompson había nacido en Massachusetts y durante su juventud participó en la guerra revolucionaria. Más tarde cambió su nacionalidad por la inglesa y llegó a ser muy pronto subsecretario de Estado en el ministerio de Colonias. Más tarde fue ministro de la Guerra en Baviera y recibió el título de conde de Rumford por la reorganización del ejército alemán. Entre todas estas actividades

militares, estaba profundamente interesado por los problemas científicos y en especial por la naturaleza del calor. No estaba convencido de las ideas contemporáneas de que el calor es una cierta sustancia, no diferente de todas las demás sustancias químicas, que unida al hielo produce agua (hielo + calor = agua o es liberada en distintos procesos de combustión. La razón de sus dudas era el hecho de que el calor se produce "de la nada" mediante la fricción que evidentemente no tiene nada que ver con la transformación química. Observando la perforación de los cañones en la fábrica de municiones de Munich se preguntaba por qué el hierro se calentaba tanto, especialmente cuando el perforador era romo. Examinó la posibilidad de que los cuerpos materiales podrían tener una capacidad mayor para el fluido calórico cuando constituyen un bloque sólido que cuando están reducidos a pequeños fragmentos; esto explicaría el desprendimiento de calor durante la perforación del cañón cuando se ha producido una gran cantidad de virutas del metal del cañón. Midió cuidadosamente la capacidad calorífica de un sólido bloque de metal y de un peso igual de virutas metálicas y encontró exactamente la misma. Intento comparar el peso de cuerpos calientes con su peso cuando se enfrían, a fin de descubrir el peso del fluido calórico escapado pero el resultado fue negativo.

Según las cifras dadas en su artículo en *London Philosophical Transactions* (1799) una caloría no puede pesar más de 0,000013 gramos. Ahora sabemos que toda forma de energía posee una masa ponderable que es obtenida, conforme a la famosa ecuación de Einstein, dividiéndola por el cuadrado de la velocidad de la luz. El peso de una caloría es realmente de 0,00000000004 mg, que está por debajo de la precisión de todas las mediciones. Todo esto le llevó a la conclusión de que el calor no puede ser una sustancia ordinaria, sino alguna clase de movimiento. Qué es el calor —escribe—. No puede ser una sustancia material. Me parece difícil, si no absolutamente imposible, imaginarme que el calor sea otra cosa que aquello que en este experimento (perforación del cañón) estaba siendo suministrado continuamente al trozo de metal cuando el calor aparecía, a saber, movimiento."

6. Equivalente mecánico del calor

Las ideas del conde Rumford fueron desarrolladas varias décadas después por el físico alemán Julius Robert Mayer en su artículo *Observaciones sobre las fuerzas de*

la naturaleza inanimada, publicado en 1842. Mayer dispuso un experimento en una fábrica de papel donde la pulpa contenida en una gran caldera era removida por un mecanismo movido por un caballo que giraba en círculo. Midiendo la elevación de la temperatura de la pulpa obtuvo una cifra para la cantidad de calor producida por una cierta cantidad de trabajo mecánico efectuado por el caballo. Sin embargo, demasiado ocupado con su práctica médica, nunca prosiguió por esta línea para realizar experimentos más precisos. El honor de medir exactamente el equivalente mecánico del calor corresponde al inglés James Prescott Joule. Para sus experimentos, Joule empleaba un aparato que consistía en una vasija llena de agua que contenía un eje giratorio con varias paletas batidoras insertas en el. El agua de la vasija no podía girar libremente al tiempo que las paletas por virtud de unas tablillas especiales insertas en las paredes de la vasija que aumentaban la fricción interior. El eje con sus paletas era movido por un peso suspendido a través de una polea, y el trabajo efectuado, por el peso en su descenso era transformado en calor de rozamiento que se comunicaba al agua. Conociendo la cantidad de agua en la vasija y midiendo la elevación de la temperatura, Joule podía calcular la cantidad total de calor producido. Por otra parte, el producto del peso impulsor por la distancia de su descenso suministraba el valor del trabajo mecánico. Repitiendo este experimento muchas veces bajo diferentes condiciones, Joule estableció que hay una proporcionalidad directa entre el trabajo realizado y el calor producido. Al anunciar en 1843 el resultado de sus estudios, escribía "El trabajo realizado por un peso de una libra que desciende 772 pies en Manchester, si se emplea en producir calor por el rozamiento del agua, elevará la temperatura de una libra de agua en un grado Fahrenheit." Esta es la cifra que, expresada en estas u otras unidades, se usa ahora universalmente siempre que se ha de traducir la energía térmica en energía mecánica o viceversa.

7. Termodinámica

Cuando quedó firmemente establecida la equivalencia del calor y de la energía mecánica, ahora conocida como la primera ley de la termodinámica, llegó el momento de extender la obra de Sadi Carnot referente a las leyes de transformación de una forma de energía en otra. El trabajo inicial en esta dirección

fue realizado durante la segunda mitad del pasado siglo por el físico alemán Rudolph Clausius y el físico inglés Lord Kelvin. Por la experiencia diaria sabemos que el calor siempre fluye desde los cuerpos calientes a los fríos y nunca en la dirección contraria. Sabemos también que la energía mecánica puede ser transformada completamente en calor, por ejemplo, por el rozamiento, mientras que una completa transformación de calor en energía mecánica representa una imposibilidad física. En efecto, como ya había observado Sadi Carnot, la producción de trabajo mecánico está asociada con un "descenso" o caída de una cierta cantidad de calor desde un alto nivel de temperatura a un nivel más bajo. Mientras que Carnot creía (equivocadamente) que el calor queda intacto al pasar del hervidor al refrigerador, la primera ley de la termodinámica afirma que parte del calor se pierde y que su equivalente aparece como trabajo mecánico realizado por la máquina de vapor. La situación es análoga a la de una casa en una colina que toma su provisión de agua de un riachuelo que corre por debajo. En lugar de accionar la bomba por un motor eléctrico, los habitantes de la casa deciden mover la bomba por una rueda hidráulica movida por el mismo riachuelo. De este modo parte del agua del riachuelo cae haciendo mover la rueda y la otra parte es elevada por la bomba a la casa. Es evidente que no se puede subir toda el agua, pues no se dejaría agua para hacer funcionar la bomba. El trabajo realizado por el agua que cae o requerido para elevarla es igual a la cantidad de agua multiplicada por la altura, así que lo mejor que podemos hacer es disponer las cosas de modo que la cantidad de agua dejada en el riachuelo sea bastante para elevar el resto a la casa. Si, por ejemplo, la altura de la presa es de tres pies y la casa está a 12 pies sobre la bomba, escribimos, llamando x la fracción de agua elevada a la casa:

$$12 \cdot x = 3\ (1 - x)$$

de donde:

$$x = 3/(12 + 3) = 1/5$$

Así pues, con esa disposición no es posible elevar a la casa más que un quinto del agua. Como veremos después, en el caso de calor que fluye de una región caliente a una región fría, siendo parcialmente transformado en energía mecánica, la fracción de calor que puede ser transformada en trabajo está dada por la fórmula

$$(T_1 — T_2)/T_1$$

donde T_1 y T_2 son las temperaturas absolutas del hervidor y del condensador. La temperatura del agua hirviendo es 100 °C o 373° absolutos y si el condensador ha sido enfriado por hielo su temperatura es 0 grados centígrados o 273° absolutos. Por tanto la eficiencia máxima de la máquina de vapor es 100/373 = 26%. En realidad, a causa de las pérdidas de calor y otras razones prácticas la eficiencia de la máquina de vapor aún es menor.

La afirmación de que *es imposible convertir calor es energía mecánica sin tener más calor "cayendo" desde un lugar caliente a un lugar frio* se conoce como la *"segunda ley de la termodinámica".* Es equivalente a la afirmación de que *el calor solo fluye por si mismo desde un lugar frio a un lugar caliente.* En efecto, si pudiéramos persuadir al calor para que fluyera por sí mismo del refrigerador al hervidor tendríamos un círculo vicioso de calor, y las máquinas de vapor podrían funcionar sin combustible. Un aparato mecánico similar sería el agua subiendo por si misma a la casa y después cayendo sobre la rueda hidráulica del molino.

En el tratamiento matemático de la termodinámica se ha introducido el concepto de "entropía", designado habitualmente por *S* y definido como la cantidad de calor recibida o perdida por el cuerpo dividida por la temperatura (absoluta) del cuerpo. Empleando la noción de entropía se puede formular la citada segunda ley de la termodinámica diciendo que *la entropía de un "sistema aislado"* (es decir, un sistema que no está en interacción mecánica con su entorno) *únicamente puede aumentar o permanecer constante.* Si ponemos un cubo de hielo en un vaso de agua caliente y el calor pudiera fluir del hielo al agua enfriando el cubo de hielo muy por debajo de cero, calentaría el agua hasta el punto de ebullición. Conforme a la segunda ley de la termodinámica esto no ocurre a causa de que correspondería a la disminución de la entropía del sistema cubo de hielo-agua.

En efecto, sea T_1 la temperatura del agua caliente y T_2 la temperatura de un cubo de hielo, de modo que $T_1 > T_2$. Supongamos una cierta cantidad de calor, que llamamos Q que fluirá espontáneamente desde el cubo de hielo al agua caliente que

le rodea. La cantidad de calor recibida por el agua seria + Q y el cambio de su entropía $\Delta S_1 = +Q/T_1$

La cantidad de calor recibida por el cubo de hielo seria Q, puesto que el hielo pierde calor, y el cambio de entropía sería

$$\Delta S_2 = -Q/T_2$$

Por tanto, el cambio total de entropía en el sistema agua-hielo seria

$$\Delta S_1 + \Delta S_2 = Q/T_1 – Q/T_2 = Q(1/T_1 – 1/T_2)$$

Y como $T_1 > T2$ se sigue que $1/T_1 > 1/T_2$ y consecuentemente, el valor encerrado en el paréntesis es negativo. Así pues, el flujo de calor desde el cubo de hielo al agua correspondería a la disminución de la entropía, lo que contradice la segunda ley de la termodinámica. Pero si el calor fluye del agua caliente al hielo, entonces los signos se invierten, el cambio de entropía es posible y el proceso está de acuerdo con las leyes de la termodinámica. Este razonamiento sólo se aplica —claro está— a sistemas "aislados", es decir, sistemas que no reciben energía del exterior. En el caso de un frigorífico de cocina o de un acondicionador de aire en la ventana, el calor es expulsado del compartimento del hielo o de la habitación al aire exterior más caliente, pero en este caso la disminución de la entropía es compensada por el trabajo hecho por la corriente eléctrica que mueve el motor.

La ley de la entropía creciente nos permite también derivar de una manera sencilla la expresión para la eficiencia de la máquina térmica que hemos dado anteriormente. Sean las temperaturas del hervidor y del refrigerador T_1 y T_2, y supongamos que una cierta cantidad de calor Q es tomada de este hervidor. El refrigerador recibirá una cantidad más pequeña de calor, Q_2, y la diferencia Q_1 — Q_2 será transformada en energía mecánica. Así la entropía del hervidor disminuirá en la cantidad Q_1/T_2 mientras que la del refrigerador aumentará en Q_2/T_1. Como el incremento de la entropía en el refrigerador debe ser mayor o al menos igual que su disminución en el hervidor, podemos escribir:

$$Q_1/T_1 \leq Q_2/T_2$$

de lo que se sigue que:

$$Q_1/Q_2 \leq T_1/T_2 \text{ ó } Q_2/Q_1 \geq T_2/T_1$$

Usando el álgebra sencilla, podemos escribirlo así:

$$(Q_2 - Q_1)/Q_1 \leq (T_1 - T_2)/T_1$$

que es la fórmula mencionada anteriormente.

8. Pájaros bebedores

Un ingenioso aparato fundado en el principio de la máquina térmica es el pájaro bebedor japonés. Consiste en un continente de cristal vacío compuesto de dos esferas unidas por un largo tubo. Dentro del continente hay una cierta cantidad de éter que se evapora rápidamente a la temperatura de la habitación. El vapor de éter, que originariamente llena la esfera del cuerpo del pájaro asciende a la esfera de la cabeza que está más fría a causa de que la capa higroscópica que lo cubre se mantiene húmeda continuamente. El éter al condensarse se reúne en la parte inferior de la esfera de la cabeza sin poder descender a causa de que el tubo se extiende hasta el centro de la esfera. Cuando se ha acumulado bastante éter, la cabeza se hace más pesada que el cuerpo y el pájaro oscila sobre el pivote hasta tomar una posición casi horizontal que permite al éter descender a la esfera del cuerpo, lo que hace que el pájaro se enderece otra vez. Cada vez que el pájaro se inclina hacia abajo, su pico se hunde en el agua lo que mantiene siempre fría su cabeza.

Si, en lugar de agua, llenamos el vaso con vodka o, aún mejor, con alcohol puro el enfriamiento de la cabeza será mayor y el pájaro funcionará más rápidamente. Por otra parte, si cubrimos el pájaro con una campana de cristal, el aire interior se saturará rápidamente de vapor y el movimiento se detendrá. Los pájaros funcionan con menos eficiencia cuando la humedad del aire atmosférico es elevada; en efecto,

el autor no pudo hacerlo mover durante todo un día típico del verano de Washington.

En relación con este juguete, que funciona por el principio de la evaporación del agua, podemos planear una interesante cuestión física. Si unimos alguna clase de mecanismo de engranaje al eje alrededor del cual se cunea el pájaro, podemos obtener cierta cantidad de energía mecánica y hacer funcionar una bomba que acarree al vaso agua del mar situado debajo.

¿Hasta qué altura sobre el nivel del mar podemos colocar el pájaro de modo que todavía siga funcionando? Podemos considerarlo como una máquina térmica en que el calor fluye del cuerpo más caliente del pájaro a la cabeza más fría y se convierte parcialmente en energía mecánica. El calor latente de la evaporación del agua (procedente de la cabeza fría del pájaro) es 539 calorías por gramo, que equivale a $2 \times 27 \times 10^{10}$ ergios de energía mecánica. La cifra debe representar también la cantidad de calor que fluye del aire caliente en el cuerpo del pájaro mientras un gramo de agua es lo evaporado desde su cabeza (a causa de que no hay acumulación o pérdida de calor en el cuerpo del pájaro).

La eficiencia de una máquina térmica al transformar el calor en energía mecánica es $(T_1 - T_2)/T_1$.

En nuestro caso T_1 y T_2 son aproximadamente 300 °K (la temperatura de la habitación), mientras que la diferencia $(T_1 - T_2)$ es tan sólo de pocos grados. Suponiendo que esta diferencia sea, por ejemplo, de 3 °C encontramos que la eficacia es aproximadamente 1 %, de suerte que la evaporación de un gramo de agua de la cabeza del pájaro produce alrededor de 2×10^8 ergios. Para elevar un gramo de agua a la altura de 1 cm, se ha de realizar un trabajo igual a la aceleración de la gravedad que tiene el valor aproximado de 1.000 (981 cm/seg^2) de suerte que 1 g de agua que se evapora de la cabeza del pájaro produce un trabajo mecánico que puede hacer que otro gramo de agua lo reemplace elevándose desde el nivel del mar a la altura de 2×10^5 cm o 2 km por encima. Naturalmente, los cálculos anteriores son muy imperfectos y varias pérdidas de energía reducen considerablemente esta cifra, pero el hecho es que los pájaros bebedores ¡pueden beber el agua del mar mientras están a alturas bastante considerables!

9. Máquinas de movimiento perpetuo del primero y segundo género

En tiempos antiguos los hombres soñaban con máquinas que pudieran trabajar indefinidamente sin combustible ni suministro alguno de energía procedente del exterior. La cadena sin fin de Stevinus discutida en el capítulo 2 fue empleada a menudo como un posible diseño de una de tales máquinas antes de que Stevinus hubiera demostrado que no podía funcionar si se aplicaban las leyes correctas del equilibrio mecánico sobre el plano inclinado.

Mientras una máquina de movimiento perpetuo del primer género contradice la primera ley de la termodinámica, es decir, la de la conservación de la energía, se podría pensar una máquina de movimiento perpetuo del segundo género que contradiría la segunda ley de la termodinámica. En efecto, si se pudiera convertir el 100% de calor en energía mecánica, la ingeniería mecánica dejaría atrás todos los proyectos anunciados de energía atómica. Podrían construirse transatlánticos que tomarían el agua del mar, extraerían su calor para mover los motores y arrojarían al mar los bloques de hielo resultantes. Se podrían construir motores de automóviles y aeroplanos que absorberían el aire atmosférico, usarían su contenido de calor como fuerza motriz y expulsarían chorros fríos de hielo por los tubos de escape. Se podría...

Pero todas estas maravillosas posibilidades están prohibidas por la segunda ley de la termodinámica, la ley de la entropía siempre creciente.

10. Argumentación termodinámica

Una vez aceptadas las leyes de la termodinámica, podemos aplicarlas para exponer varios fenómenos físicos y probar muchas importantes afirmaciones sobre ellas. Consideremos, por ejemplo, una cubeta de agua con un tubo capilar que se eleva verticalmente sobre la superficie del agua. Para aislar del contorno este sistema lo cubrimos con una caja de cristal y extraemos el aire de ella. Es sabido que el agua se eleva en el tubo capilar formando un menisco cóncavo. Preguntémonos ahora lo que sucederá. Ante todo, parte del agua de la cubeta se convertirá en vapor de agua que llenará el interior de la caja de cristal. Por virtud de la gravedad, la densidad y presión del vapor será mayor en el fondo de la caja y menor en lo alto,

como ocurre en la atmósfera terrestre. Ahora bien, sabemos que para una temperatura dada, hay una cierta presión del vapor la cual está "en equilibrio" con el líquido. Si la presión del vapor es demasiado alta, una parte se condensará en líquido y si es demasiado baja algo del líquido se evaporará produciendo más vapor. Ahora vamos a probar mediante la argumentación termodinámica que la presión del vapor sobre la superficie cóncava del líquido capilar es menor que sobre la superficie plana. Supongamos, en efecto, que esta afirmación no sea verdad y que la presión del vapor es independiente de la curvatura de la superficie del líquido. Qué sucedería en este caso? Como, por virtud de la gravedad, la presión del agua en la superficie del menisco es menor que sobre la superficie del agua de la cubeta, el agua se evaporaría dentro del tubo capilar y se condensaría en la cubeta. Esto haría elevarse el agua en el tubo capilar y este movimiento continuaría indefinidamente. Podríamos entonces colocar en el tubo capilar alguna clase de molino de agua y el aparato funcionaria indefinidamente, en contradicción con la segunda ley de la termodinámica. Como esta ley no puede ser contradicha, concluimos que *la presión del vapor sobre la superficie cóncava de un líquido es menor que sobre la superficie plana.* Análogamente (tomando un tubo capilar cerrado con cera en cuyo caso el menisco está bajo la superficie del agua de la cubeta y es convexo) concluimos que *la presión del vapor sobre la superficie convexa de un líquido es mayor que sobre la superficie plana.* Cuanto más delgado es el tubo, mayor es la diferencia de alturas y, en consecuencia, mayor el cambio de la presión del vapor. Empleando los valores numéricos de la tensión superficial constante (que determina la altura de la columna de agua en los tubos capilares) y la densidad del vapor de agua (que determina la diferencia de presión entre el nivel de la cubeta y el nivel del tubo capilar) podemos obtener una fórmula que exprese la dependencia en que la presión del vapor está respecto a la curvatura de la superficie del agua. Si esta fórmula no fuera verdad, entonces el agua correría continuamente a través del tubo capilar y tendríamos una máquina de movimiento perpetuo del segundo género.

La conclusión a que hemos llegado tiene una importante significación para comprender el fenómeno de la lluvia. Las nubes que flotan altas en el cielo están formadas por innumerables gotitas de agua (niebla) que son tan pequeñas y ligeras

que no tienen la menor tendencia a descender. Algunas de estas gotitas son mayores, otras menores. ¿Cuál es el efecto de la diferencia en los tamaños de las gotas? Como hemos visto antes la presión del vapor sobre las superficies convexas es mayor que sobre las superficies planas y la diferencia de presión aumenta al disminuir el radio de la curvatura. Así pues, la presión del vapor será más elevada sobre la superficie de las gotas más pequeñas y más baja sobre la superficie de las mayores. Como resultado de esta diferencia de presión, el vapor fluirá desde las gotas pequeñas a las mayores, condensándose en su superficie y, por tanto, aumentando su tamaño. Por otra parte, las gotas más pequeñas se evaporarán gradualmente y finalmente se desvanecerán. Las gotas crecientes pronto serán demasiado grandes para flotar en el aire y la lluvia caerá sobre nuestras cabezas y paraguas.

11. Teoría cinética del calor

Durante el último cuarto del siglo pasado (siglo XIX) fue desarrollada aún más la teoría del calor y la correlación de la ley fundamental de la termodinámica con la idea de que el calor es la energía del movimiento de las pequeñas partículas —las moléculas de que están formados los cuerpos materiales—. principalmente por Ludwig Boltzmann en Alemania, James Clerk Maxwell en Inglaterra y Josiah Gibbs en los Estados Unidos. Cuando se estudia el movimiento de las innumerables pequeñas moléculas que forman los cuerpos materiales es, desde luego, imposible (así como inútil) seguir exactamente la trayectoria de cada partícula individual. Lo que deseamos conocer es el comportamiento medio de las moléculas bajo diferentes condiciones físicas, lo que nos obliga al empleo de las leyes estadísticas. Los métodos estadísticos son usados siempre en las relaciones humanas cuando está implicado un gran número de individuos. Las compañías de seguros, las oficinas estatales que tratan de la producción alimenticia por los agricultores, etc., fundan su política en datos estadísticos y no se interesan por la muerte de fulano de tal o los detalles relativos a la granja que lleva zutano. Si se tiene en cuenta que la población de los Estados Unidos es aproximadamente de 170.000.000 de habitantes, mientras que el número de moléculas en un centímetro cúbico de aire es de 20.000.000.000.000.000.000, vemos que las leyes estadísticas tienen que

aplicarse mucho más exactamente en el caso de las moléculas que en el caso de las personas.

Es sumamente fácil aplicar las consideraciones estadísticas al caso de los gases en los cuales, en contraste con los líquidos y sólidos, las moléculas se mueven libremente a través del espacio chocando unas con otras y con las paredes del recipiente. Las paredes de una vasija que contiene gas están cometidas al bombardeo constante de las moléculas que rebotan en ellas, lo que proporciona una fuerza constante, la presión del gas. Supongamos que la misma cantidad de gas está contenida en un recipiente que solo tiene la mitad del volumen que el anterior. Como en este caso el número de moléculas por unidad de volumen será dos veces mayor, dos veces más moléculas rebotarán cada segundo en una determinada área de la pared y por tanto la presión del gas será doble. Esto explica la ley de la proporción inversa de la presión y el volumen del gas descubierta por Robert Boyle.

Veamos ahora lo que ocurre cuando las moléculas se mueven más rápidamente. Se producirán dos efectos:

1) Más moléculas chocarán contra una determinada área de la pared por segundo;
2) La fuerza de cada impacto determinada por el momento mecánico ("cantidad de movimiento" en la terminología de Newton) de las moléculas aumentará.

Como ambos efectos son proporcionales a la velocidad molecular, la presión aumentará como el cuadrado de esta velocidad o, lo que es lo mismo, como la energía cinética de las moléculas. Hemos visto que, conforme a la ley de Charles y Gay-Lussac, la presión del gas mantenido en un volumen constante es proporcional a su temperatura absoluta, de lo que se deduce que la *temperatura absoluta es simplemente la medida de la energía del movimiento térmico de las moléculas.* No importa de qué clase de moléculas se hable, puesto que una de las leyes fundamentales de la mecánica estadística, conocida como "ley de equipartición de la energía”, declara que en *el caso de usa mezcla de un gran número de partículas de dos o más deferentes masas, la energía cinética media por partícula sigue siendo la misma.* Así, por ejemplo, en una mezcla de moléculas de hidrógeno y moléculas de oxigeno, que son dieciséis veces más pesadas, la velocidad de las moléculas de

oxigeno es cuatro veces menor que la de las moléculas de hidrógeno, de modo que el producto de sus masas por el cuadrado de su velocidad es la misma. A la temperatura de la habitación, es decir, a unos 300 °K absolutos, la energía del movimiento térmico es aproximadamente 0,0000000000000002 ergios, que, en el caso de las moléculas del aire corresponde a la velocidad de 50.000 cm/s. (aproximadamente 1.000 millas por hora).

La energía del movimiento térmico determinado por la temperatura absoluta es, claro está, sólo el término medio de un gran número de partículas, y como siempre ocurre en los fenómenos estadísticos, la energía de las distintas moléculas puede mostrar una gran desviación del valor medio. Debido a los azares de sus mutuas colisiones, algunas de las moléculas pueden alcanzar por corto tiempo velocidades mucho mayores mientras otras pueden ir temporalmente más despacio. Mediante las leyes de la mecánica estadística se puede calcular el porcentaje de moléculas en un gas que se desvían en grados diferentes de la exacta velocidad media. Esta curva de distribución de las velocidades, que fue calculada primeramente por Maxwell y lleva su nombre, se muestra en la Figura 21.

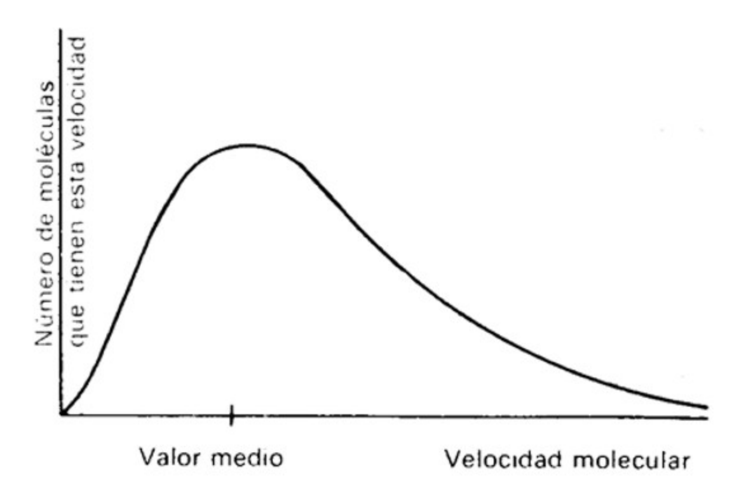


Figura 21. Curva de Maxwell de la distribución de velocidades.

Otro concepto importante, en la teoría estadística de los gases es el de "trayecto medio libre", es decir, la distancia media recorrida por las moléculas entre dos colisiones. En el aire atmosférico es muy corta, tan sólo 0,00001 cm aproximadamente, mientras en el caso del gas sumamente enrarecido que llena el espacio interestelar una molécula puede recorrer muchas millas antes de

encontrarse con otra. La brevedad de la trayectoria libre explica el hecho de que las moléculas, moviéndose tan rápidamente como lo hacen, tarden mucho tiempo en ir de un límite al otro de la habitación; de hecho, están en la situación del jugador de fútbol-rugby con la pelota en sus manos que corre hacia la línea de “gol" y es atajado casi a cada paso por sus adversarios. Naturalmente mientras un jugador de fútbol tiene la línea del gol como su meta y trata de correr hacia ella, las moléculas son ciegas en su movimiento y después de cada nueva colisión saltan en cualquier dirección. Se puede demostrar matemáticamente que en el caso de tal movimiento, llamado "marcha al azar", la distancia media recorrida después de varios pasos es igual a la longitud de cada paso multiplicada por la raíz cuadrada del número total de pasos, no por el número de pasos como ocurriría si todos fueran en la misma dirección. Así, tenemos la fórmula:

$$distancia\ recorrida = longitud\ de\ un\ paso \cdot \sqrt{número\ de\ pasos}$$

En el caso de las moléculas de aire, la longitud de cada paso es 0,00001 cm y, si debe recorrer una distancia, por ejemplo, de 10 metros (1.000 cm) la fórmula anterior nos dice que el número total de pasos debe ser igual a

$$\left(\frac{1000}{0.00001}\right)^2 = 10.000.000.000.000.000$$

A la velocidad de 50.000 cm por segundo, cada paso será realizado en

$$\frac{0{,}00001}{50.000} = 0.0000000002\ seg$$

De suerte que el tiempo total del recorrido será

10.000.000.000.000.000 · 0,0000000002 = 2.000.000 seg

O sea ¡20 días!

¿Cómo explica la teoría cinética del calor la ley fundamental de la termodinámica que declara que en todos los procesos térmicos la entropía debe aumentar siempre? ¿Cuál es la significación de la entropía en cualquier caso desde el punto de vista de la teoría estadística del movimiento molecular? ¿Por qué el calor fluye siempre de los cuerpos más calientes a los más fríos y por qué no podemos transformar completamente una cierta cantidad de calor en energía mecánica mientras que no es problema transformar la energía mecánica en calor? La respuesta a todas estas preguntas resulta naturalmente si nos damos cuenta de lo que ocurre a las moléculas en estos casos.

Consideremos un recipiente dividido en dos mitades por una división aisladora térmica; llenemos una mitad con un gas caliente; la otra con un gas frío y quitemos el tabique. ¿Qué sucederá? Evidentemente las moléculas rápidas del gas caliente perderán su energía en los choques con las moléculas más lentas del gas frio y el proceso continuará hasta la equipartición de la energía entre todas las moléculas, es decir, hasta que se llegue a la igualdad de temperatura en ambas mitades del recipiente. La situación es idéntica al caso de una caja cuya mitad inferior está llena de bolitas negras y la superior con blancas. Si sacudimos la caja, las bolitas se mezclarán de modo que las blancas y las negras con el tiempo quedan distribuidas por toda la caja desde el fondo hasta la superficie. ¿Podemos separarlas otra vez mediante más sacudidas al recipiente? Teóricamente, si. No hay, en efecto, razón por la cual esta separación no pudiera ser realizada, pero es muy improbable que lo fuera. Podemos haber sacudido la caja durante siglos, acaso millones de años, hasta que por puro azar todas las bolas negras vuelvan a reunirse en el fondo y todas las blancas en la cima. Esto es verdad también en el caso de las moléculas de gas. En principio es posible que una mitad de las moléculas sea retardada por los choques casuales mientras la otra mitad sea acelerada del modo correspondiente. Pero ¡es sumamente improbable!

Una situación similar existe en el caso de la transformación de la energía mecánica en calor y viceversa. Imaginemos una bala que choca contra un muro de acero. Mientras la bala camina por el aire hacia el blanco, todas sus moléculas se mueven juntas en la misma dirección y con la misma velocidad (este movimiento común de las moléculas se sobrepone, por supuesto, a sus movimientos irregulares debidos a

la temperatura inicial de la bala). Cuando el proyectil es detenido por el muro, este movimiento organizado se convierte en un movimiento irregular de las partículas individuales, aumentando la primitiva agitación térmica de las moléculas que forman la bala y el muro. Aquí podemos imaginar el proceso inverso en que las moléculas que constituyen el final de una barra metálica calentada a la llama tengan, por puro azar, sus velocidades térmicas orientadas en la misma dirección de suerte que esta posta metálica se separará como si fuera disparada por un fusil. Pero también esto es sumamente improbable. Así pues, vemos que la ley de la entropía creciente es simplemente la afirmación de que *es todos los procesos naturales el movimiento organizado de las moléculas tiene la tendencia a convertirse en desorganizado o sin orden ni concierto.* Todos los procesos se desarrollan en dirección del tipo menos probable de movimiento molecular al más probable, y el aumento de entropía corresponde al aumento de la probabilidad del tipo de movimiento molecular.

Se puede deducir la relación entre la probabilidad de un cierto tipo de movimiento molecular y la entropía de la sencilla manera siguiente, propuesta primeramente por Ludwig Boltzmann. Supongamos dos sistemas termodinámicos, A y B, que pueden ser dos recipientes llenos de dos gases diferentes a dos presiones diferentes o bien otro sistema más complicado conteniendo líquidos, sus vapores, cristales sólidos, sus soluciones en los líquidos, etc.

Si los dos sistemas tienen la misma temperatura T y ponemos en contacto uno con otro, no fluirá ningún calor en ninguna dirección y los dos sistemas permanecerán en el mismo estado que cuando estaban separados. Supongamos que una cierta cantidad de calor fluye del exterior en los sistemas, el sistema A ganando Q_A calorías y el sistema B ganando Q_B calorías. Si consideramos separadamente los dos sistemas, el aumento de su entropía será dada por Q_A/T y Q_B/T. Si los consideramos como un solo sistema compuesto, el aumento total de entropía será $(Q_A + Q_B)/T$.

Como $Q_A/T + Q_B/T = (Q_A + Q_B)/T$ concluimos que la *entropía de un sistema compuesto es igual a la suma de las entropías de sus partes.*

¿Cómo considerar esta situación desde el punto de vista de las probabilidades de los varios tipos de movimiento molecular? ¿Cómo expresar esta probabilidad para el sistema compuesto A y B en términos de las probabilidades de A y B aislados?

Según la teoría matemática de las probabilidades, *la probabilidad de un suceso compuesto* (es decir, que debe satisfacer varias condiciones independientes) *está dada por el producto de las probabilidades de los sucesos individuales de que está compuesto.* Así, si de un niño se espera que sea "alto, moreno y guapo" las probabilidades de que se cumpla esa esperanza es el producto de las probabilidades de que sea alto, de que sea moreno y de que sea guapo. Si la probabilidad de que un hombre sea alto es 1/4 (es decir de una contra cuatro), de que sea moreno es 1/3 y de que sea guapo 1/50, la probabilidad de que se cumplan las tres condiciones es:

$$1/4 \cdot 1/3 \cdot 1/50 = 1/600$$

es decir, una contra 600.

Así vemos que, mientras en un sistema termodinámico compuesto las entropías deben sumarse, las probabilidades deben multiplicarse. ¿Qué género de dependencia matemática entre dos cantidades satisface esta condición? Naturalmente la dependencia logarítmica, puesto que para multiplicar dos números debemos sumar sus logaritmos. Así, la entropía debe variar como el logaritmo de la probabilidad y debemos escribir:

$$S = k \log P$$

donde k es un coeficiente numérico llamado coeficiente Boltzmann.

La fórmula anterior constituye un puente entre la termodinámica clásica y la teoría cinética del calor y nos permite calcular todas las cantidades termodinámicas sobre la base de consideraciones estadísticas.

12. El demonio de Maxwell

Una persona muy importante en la física estadística es el "demonio" de Maxwell, un producto de la imaginación de James Clerk Maxwell, que significó una gran contribución a esta rama de la ciencia. Imagínese un diminuto diablillo muy activo que puede ver las moléculas individuales y es bastante rápido para manejarlas

como un campeón maneja las pelotas de tenis. Este demonio puede servimos para vencer la ley de la entropía creciente manipulando una ventanita en una pared que separa dos cámaras de gas, A y B. Se supone que el postigo de la ventana se desliza sin la menor fricción y que el demonio lo abre cuando ve que una partícula especialmente rápida se dirige hacia ella y lo cierra cuando la partícula que se aproxima es lenta. De esta suerte todas las moléculas rápidas de la distribución maxweliana pasarían a la cámara B mientras que solo las lentas quedarían en la cámara A. La B estaría más caliente y la A más fría con el calor fluyendo en la dirección equivocada contra la segunda ley de la termodinámica.

¿Por qué no podría hacerse lo mismo, no con auxilio de un demonio real, claro está, sino valiéndose de algún diminuto aparato físico construido ingeniosamente que actuase de la misma manera? Para comprender la situación recordemos una misteriosa pregunta formulada por el famoso físico austríaco Erwin Schrödinger en su interesantísimo folleto *¿Qué es la vida?:* "¿Por qué los átomos son tan pequeños?" A primera vista esta pregunta parece en absoluto sin sentido, pero lo tiene y se puede responder si se invierte y preguntamos: ¿Por qué somos tan grandes (comparados con los átomos? La respuesta es sencillamente que un organismo tan complejo como un ser humano, con su cerebro, sus músculos, etc. no puede ser construido con unas cuantas docenas de átomos del mismo modo que no se puede construir una catedral gótica con unas cuantas piedras.

El demonio de Maxwell y cualquier aparato mecánico que le sustituyera habría de estar construido de un pequeño número de átomos y no le sería posible realizar las complicadas tareas que se le asignasen. Cuanto más pequeño el número de partículas, tanto mayores las fluctuaciones estadísticas en su comportamiento, y un automóvil en el cual una de las cuatro ruedas saltara espontáneamente para convertirse en el volante mientras el radiador se convertía en el depósito de gasolina y viceversa, no sería un vehículo que se pudiera conducir. Del mismo modo, un demonio de Maxwell, real o mecánico, haría tantos errores al manejar las moléculas que todo el intento fracasaría por completo.

13. Movimiento térmico microscópico

Las grandes cifras y las muy pequeñas citadas arriba para el mundo molecular son resultados del cálculo, puesto que las moléculas y sus movimientos son demasiado pequeños para observarlos aun con los mejores microscopios. Sin embargo, ocurre que podemos salvar el abismo que existe entre las moléculas invisibles y los grandes cuerpos que encontramos en nuestra experiencia cotidiana examinando el comportamiento de las pequeñas partículas, de 1 micrón *(μ),* o así, de diámetro, que por una parte son suficientemente pequeñas para mostrar un movimiento térmico acusable y por otra parte bastante grandes para verlas con un buen microscopio. El botánico inglés Robert Brown observó por primera vez que las esporas de plantas que flotan en el agua nunca están quietos, sino implicados en una especie de "tarantela" saltando irregularmente de un lado a otro como si fueran golpeados constantemente por algún agente invisible. El propio Brown y sus contemporáneos científicos fueron incapaces de explicar este caprichoso comportamiento de las pequeñas partículas y solo casi cien años después fue interpretado por el físico francés Jean Perrin como el resultado de numerosos impactos recibidos por ellos procedentes de las moléculas de agua que se encuentran en un movimiento térmico. Los estudios de Perrin sobre el movimiento browniano suministraron una prueba indiscutible de la exactitud de la teoría cinética del calor y permitió a los físicos observar directamente las leyes estadísticas del movimiento que antes eran meras conjeturas teóricas. La exacta teoría matemática del movimiento browniano fue desarrollada por el joven Albert Einstein en uno de los tres artículos que publicó en 1905. Los otros dos eran sobre teoría cuántica de la luz y sobre la teoría de la relatividad. Hoy la teoría estadística del calor, llamada más generalmente "física estadística", únicamente puede compararse con la mecánica newtoniana en punto a claridad y perfección.

14. El movimiento térmico y la propagación del sonido

Es sabido que el sonido no es más que ondas de compresión que se propagan a través del aire y otros materiales. Los estudios experimentales revelan el hecho curioso de que la velocidad del sonido es independiente de la densidad del aire y que al nivel del mar es la misma que en la enrarecida atmósfera superior. Por otra parte, esta velocidad depende de la temperatura del aire siendo directamente

proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. ¿Cómo se pueden explicar estos hechos desde el punto de vista de la estructura molecular y el movimiento térmico?

Para hacerlo hemos de recordar que el aire está compuesto con velocidades que aumentan con la temperatura. Cuando se emite una onda de compresión, digamos por la vibración de un diapasón, las moléculas de aire más cercanas a las puntas del diapasón son empujadas en la dirección del movimiento y en la colisión con otras moléculas situadas más lejos (en la siguiente delgada capa de aire) les comunican el empuje. Estas, a su vez, empujan a las moléculas de la siguiente capa, y así la compresión se propaga a través del aire formando una segunda onda. Como las moléculas de aire tienen que recorrer una distancia relativamente larga (la llamada "trayectoria libre") antes de chocar con las moléculas de la siguiente capa, la velocidad de propagación está determinada esencialmente por la velocidad térmica de las moléculas. Esta concepción dinámica explica los dos hechos antes mencionados relativos a la velocidad del sonido. En efecto, la velocidad térmica de las moléculas es la misma para una cierta temperatura dada, indiferentemente de que el gas este comprimido o enrarecido. Por otra parte, como la energía cinética de las moléculas es proporcional a la temperatura absoluta, su velocidad aumenta como la raíz cuadrada de la temperatura. Y lo que es verdad para la velocidad de las moléculas tiene que ser verdad también para la velocidad del sonido.

Cosa enteramente distinta ocurre cuando la velocidad del objeto que produce la compresión del gas supera a la velocidad del movimiento térmico molecular bajo ciertas condiciones. Así sucede, por ejemplo, cuando los gases calientes formados en una explosión empujan el aire circundante o cuando el aire es separado por las alas y el cuerpo de un avión supersónico o proyectil cohete. En este caso, la velocidad térmica, de las moléculas no es bastante alta para escapar del objeto que avanza y comienzan a acumularse una sobre otra con el resultado de un aumento de densidad. El frente progrediente del gas fuertemente comprimido forma lo que se llama "onda de choque". A causa de la densidad muy aumentada, las ondas de choque poseen la correspondiente sobrepresión que explica sus efectos destructores. En el caso de las explosiones, la expansión de los gases calientes va disminuyendo, la compresión del aire se separa del objeto que empuja, y continúa

propagándose como onda de choque. En el caso de los aviones supersónicos y proyectiles cohetes que vuelan con una velocidad constante, movidos hacia adelante por sus motores, la onda de choque queda estacionaria respecto al cuerpo móvil y por eso se conoce como "choque continuo".

15. Emisión de la luz por cuerpos calientes

Es muy conocido que todos los cuerpos materiales se hacen luminosos cuando se les calienta a una temperatura suficientemente alta. Así fue producida la luz por la llama de los anticuados mecheros de gas; así es como la luz es producida por los filamentos calientes de las modernas bombillas eléctricas; en la escala cósmica, el Sol y las estrellas emiten luz a causa de que sus superficies están muy calientes. Es una experiencia vulgar que a temperaturas relativamente bajas, como en el caso de las unidades de calefacción doméstica, se tiene calor radiante pero no luz visible. La unidad de calor de las cocinas, a la temperatura de 600° a 700° está al "rojo" brillando con una luz débilmente rojiza. El filamento de una bombilla eléctrica, calentado a una temperatura superior a los 2.000° emite una luz brillante que, sin embargo, parece amarillenta comparada con la luz de un brillante arco voltaico que está a una temperatura entre 3.000° y 4.000°. La superficie del Sol a una temperatura de unos 6.000° emite luz que es más rica en rayos azules que la luz emitida por todas las fuentes citadas. Así, cuando la temperatura aumenta, la radiación emitida se hace rápidamente más intensa y más rica en longitudes cortas de onda.

En la Figura 22 se ve la distribución de intensidad observada entre las diferentes longitudes de onda en la radiación emitida por cuerpos materiales a diferentes temperaturas. A los 2.000 grados (absolutos) toda la energía está en la región de los rayos caloríferos de onda larga con cero de intensidad en la región de la luz visible señalada con rayas. A los 4.000° hay alguna luz visible, pero la intensidad de los rayos rojos excede considerablemente a la intensidad de los rayos amarillos, verdes y azules.

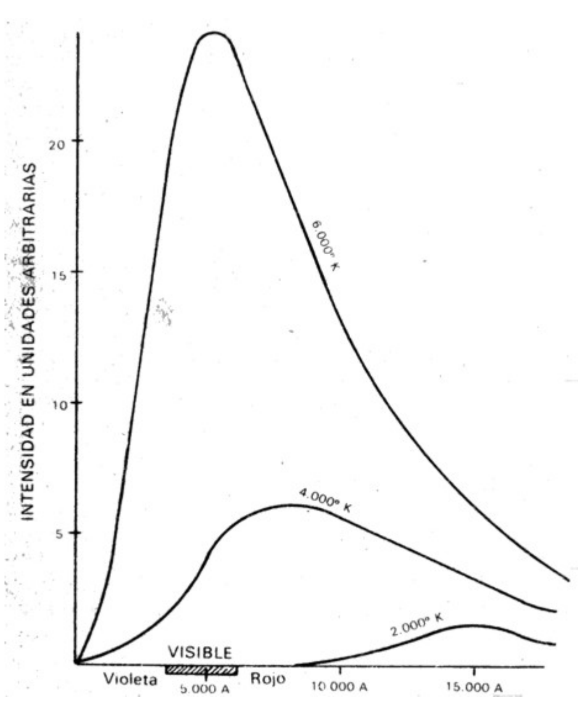


Figura 22. Distribución de la energía en un espectro continuo emitido por cuerpos con tres temperaturas diferentes

A los 6.000° (la temperatura de la superficie del Sol) el máximo de intensidad cae en la región amarilla del espectro y percibimos la mezcla de colores como "luz blanca”. A temperaturas aún más altas, el máximo de intensidad se mueve hacia la región del ultravioleta invisible: así, hay estrellas tan calientes (varios cientos de miles de grados) que la mayor parte de la luz emitida por ellas cae en esta invisible región ultravioleta.

La emisión de la luz por cuerpos calientes está sujeta a dos importantes leyes descubiertas durante la segunda mitad del siglo XIX:

La ley de Wien, establecida por el físico alemán Wilhelm Wien (1864 - 1928), declara que *la longitud de onda correspondiente al máximo de intensidad en el espectro es inversamente proporcional a la temperatura (absoluta) del cuerpo caliente emisor*. Así vemos en la Figura 22 que mientras a 6.000° absolutos el máximo de intensidad es de 5.000 Å, pasa a los 15.000 Å (unidad Angström) a la temperatura de 2.000 ° absolutos.

La ley de Stefan-Boltzmann fue descubierta por el físico alemán Josef Stefan (1835-1839) y después deducida teóricamente, usando los razonamientos termodinámicos de Ludwig Boltzmann, expuestos antes en este libro. La ley dice que la cantidad

total de energía emitida por un cuerpo caliente es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura (absoluta). En efecto, el área bajo la curva señalada con 6.000 en la Figura 22 es 3^4 = 81 veces mayor que el área marcada con 2.000° .

16. Emisión de luz por los gases calientes

La exposición de la emisión de luz por cuerpos calientes dada en la sección anterior se refiere al caso de materiales sólidos o líquidos tales como el filamento de tungsteno de una bombilla eléctrica o el hierro fundido en una siderurgia[16]. Pero en el caso de una luz emitida por gases calientes la situación varía. Si miramos a través de un prisma la luz emitida por una lámpara de gas (o de keroseno) vemos un espectro continuo que recorre todo el camino desde el rojo al violeta. Pero se puede demostrar que este espectro continuo no se debe realmente a los gases calientes de la llama, sino más bien a las menudas partículas sólidas de hollín que hay en ella.

Si se consigue una combustión completa del gas, como en el mechero Bunsen, debido al físico alemán Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899), se obtiene una llama que, siendo muy caliente, emite muy poca luz. Bunsen usaba su mechero para estudiar la emisión de varios materiales en forma gaseosa. Si se introduce en la llama de un mechero Bunsen una pequeña cantidad de sodio (que puede ser empleado en la forma de cloruro de sodio, es decir, la vulgar sal de mesa), la llama se torna de un amarillo brillante. Al analizar esta luz por medio de un prisma a la antigua manera del viejo Isaac Newton, se encuentra que el espectro consiste en una sola línea amarilla faltando todas las otras ondas de luz. Un experimento similar con el potasio, que da a la llama un vivo color rojo, muestra una línea roja más a la derecha del rojo del espectro. Otros materiales convertidos en vapor en la llama caliente del mechero Bunsen dan lugar a otras rayas, a veces sencillas, a veces en gran número.

¿Por qué los gases calientes emiten la luz de longitudes de onda estrictamente seleccionadas (o lo que es lo mismo de frecuencias estrictamente seleccionadas)

[16] El material del Sol está en estado gaseoso a causa de las temperaturas sumamente altas que van desde 6.000° absolutos en la superficie a 20.000.000° en el centro. Sin embargo, excepto para una delgada capa exterior, llamada *cromoesfera* los gases que forman el cuerpo del Sol están comprimidos a una densidad comparable a la de los corrientes materiales sólidos y líquidos y por tanto emiten un espectro continuo.

mientras que los sólidos o líquidos calientes emiten la entera gama de las longitudes de onda formando un espectro continuo? Como veremos más tarde, un átomo o una molécula puede ser comparado con un instrumento musical, sin más diferencia de que emiten ondas luminosas en lugar de ondas de sonido. Un instrumento musical, sea un modesto diapasón o un gran piano, está construido de modo que únicamente produce un surtido de frecuencias de sonidos seleccionados (uno en el diapasón, muchos en el gran piano) que suenan unos tras otros formando una melodía. Los átomos y moléculas también emiten una selección de longitudes de ondas luminosas, típica para cada uno de ellos. Los gases, átomos o moléculas, vuelan libremente por el espacio chocando unos contra otros constantemente. A cada colisión son "excitados" (si la temperatura es bastante alta) y vuelan, vibrando y emitiendo ondas de luz características para ellos. Así, el vapor de sodio, de cobre, de hierro o cualquier otro emiten características rayas espectrales por las cuales pueden ser reconocidos. Por otra parte, en los sólidos, los átomos están tan estrechamente unidos que la situación se parece más a la de un gran saco en el cual todos los instrumentos de una orquesta sinfónica están apilados confusamente unos sobre otros. Si sacudimos el saco, oiremos el ruido que contiene todas las frecuencias audibles y que no tiene nada que ver con las propiedades particulares de los instrumentos que contiene. Del mismo modo, los átomos apilados en un trozo de metal o cualquiera otra sustancia sólida (o líquida) pierden sus propiedades de tono puro y la luz emitida por el hierro al rojo no difiere mucho de la emitida por el cobre al rojo o cualquier otra cosa al rojo.

La especificidad de la emisión de luz de las diferentes sustancias representa la base para un importante método de análisis espectral que nos permite encontrar la composición química de un material dado simplemente observando la luz emitida por su vapor.

17. Absorción de la luz

Volvamos a nuestro experimento con un mechero Bunsen que contiene sodio en su llama. Supongamos que tras la llama colocamos una fuente muy intensa de luz con un espectro continuo tal como un arco voltaico. La luz procedente del electrodo al rojo blanco del arco pasará a través de la llama y atravesando el resquicio de la

pantalla produce en el espectroscopio una banda con los colores del arco iris. Pero observamos que la continuidad del color está interrumpida por una estrecha línea oscura situada exactamente en el mismo lugar donde estaba la raya amarilla del sodio. Este efecto es debido a un importante fenómeno llamado *resonancia* que ocurre en todos los casos en que tratamos con alguna clase de oscilación. Supongamos un niño en un columpio en el campo de juegos al que su padre empuja. Si el padre impulsa el columpio rítmicamente en intervalos de tiempo iguales al período de la propia oscilación del columpio, la amplitud del movimiento será cada vez mayor y el niño se complacerá o asustará. Pero si el padre es distraído por una bonita niñera que está allí cerca y no repite los impulsos dentro de los períodos adecuados, nada bueno resultará de sus esfuerzos. A veces impulsará el columpio cuando se separa de él y esto será favorable; otras le impulsará cuando el columpio venga hacia él y esto le lastimará. Para aumentar la amplitud de cualquier oscilación, la fuerza debe ser aplicada en períodos iguales al período propio del objeto oscilante. Si situamos dos diapasones idénticos cercanos entre sí, y comenzamos a hacer vibrar uno de ellos golpeándolo con un macillo, las ondas sonoras que emite harán muy pronto que el otro diapasón entre también en movimiento. Pero si los dos diapasones tienen diferentes períodos de vibración, no ocurrirá nada. Del mismo modo, para sintonizar un receptor de radio o de televisión con la estación deseada se hace girar el botón que hace que la frecuencia de vibración del aparato receptor sea igual a la de la estación emisora.

Nuestro experimento con la llama que contiene sodio entra en la misma categoría. Los átomos de sodio resuenan con aquella longitud de onda particular en el espectro continuo del arco voltaico igual a la que pueden emitir y dispersan estas ondas en todas direcciones, debilitando, por tanto, el rayo originario. La línea negra de absorción en este caso no es, por supuesto, completamente negra. De hecho puede ser más brillante que la línea originaria de emisión, Pero parece muy oscura en contraste con otras partes del espectro continuo del arco. La ley de que *todas las sustancias absorben las mismas frecuencias de luz, que pueden emitir* fue descubierta por el físico alemán Gustav Kirchhoff (1824-1887) y lleva su nombre. Esta ley es de gran importancia en varias ramas de la física, química y astronomia.

Una de sus aplicaciones más importantes es el estudio de la composición química del Sol y otras estrellas.

A comienzos del siglo XIX, un físico alemán, Joseph von Fraunhofer (1787-1826), repitiendo los experimentos de Newton sobre el espectro solar, pero empleando prismas de una calidad mucho mejor, quedó sorprendido al ver que la banda de colores del arco iris estaba interrumpida por un gran número de rayas negras muy delgadas. El origen de estas "rayas de Fraunhofer" puede ser comprendido fácilmente sobre la base de lo que acabamos de decir. Hemos dicho que, aunque el cuerpo del Sol está compuesto por completo de materia gaseosa emite un espectro continuo porque los átomos están tan juntos que "no tienen holgura para tender su arco sin interferir con los arqueros vecinos". Pero la capa más exterior del cuerpo del Sol, llamada cromosfera, está formada por gases calientes sumamente enrarecidos y *produce* tonos ópticos puros. Cuando el espectro continuo dado por la *fotosfera* (es decir, el cuerpo denso del Sol) pasa a través de la cromosfera, las longitudes de onda que corresponden a los elementos químicos que hay en ella son absorbidas y dispersadas y las oscuras rayas de Fraunhofer aparecen en el arco iris originariamente sin manchas. El empleo del análisis espectral en astronomia nos ha proporcionado enormes progresos en nuestro conocimiento del Sol y las estrellas y ha abierto a los ojos humanos perspectivas ilimitadas del universo en que vivimos.

Capítulo 5
La edad de la electricidad

1. Primeros descubrimientos

Como queda dicho en el primer capítulo, los fenómenos de la electricidad y el magnetismo fueron conocidos por los antiguos griegos y probablemente por todo el resto del mundo antiguo. Sin embargo, los primeros estudios sistemáticos no fueron emprendidos hasta el comienzo del Renacimiento de las ciencias y las artes. Sir William Gilbert, médico personal de la reina Isabel I de Inglaterra, llevó a cabo cuidadosos estudios de las interacciones magnéticas y publicó sus resultados en un libro, *De Magnete*, que contiene una descripción de todas las esenciales propiedades cualitativas de los imanes. Gilbert fue un partidario entusiasta del sistema copernicano del mundo y esperaba que las fuerzas que mantienen a los planetas en su movimiento orbital en torno al Sol pudieran ser explicadas como el resultado de la atracción magnética. Para estudiar estos problemas más minuciosamente hizo unas esferas de magnetita (mineral de hierro magnético) y estudió el campo en torno a ellas mediante diminutas agujas de brújula puestas en diferentes direcciones y a diferentes distancias en torno de las esferas. Así, observó que en un punto de la esfera había un máximo de atracción del otro extremo. En los distintos puntos de la superficie de la esfera la aguja siempre se orientaba en una posición definida a lo largo de un gran círculo o meridiano que enlazaba los puntos de atracción máxima o polos magnéticos de la esfera. Esto era sorprendentemente análogo al comportamiento de las agujas de la brújula en los distintos puntos de la Tierra, y Gilbert concluyó que nuestro globo puede ser considerado como un imán o magneto gigantesco con sus polos situados cerca de los polos norte y sur geográficos. Este concepto sobrevivió a través de los siglos, y después de haber sido desarrollado matemáticamente por el gran matemático alemán Karl Friedrich Gauss es hoy un concepto fundamental en la teoría del magnetismo terrestre. Por otra parte, los intentos de Gilbert de hacer a fuerzas magnéticas responsables del movimiento de los planetas en torno al Sol fracasaron por completo y pararía medio siglo hasta que Newton explicase este movimiento y la botella de Leyden. El electroscopio, es decir, un instrumento que revela la presencia de una carga

eléctrica, fue construido por primera vez en 1705 por Haukesbee y consistía en dos pajas suspendidas cara a cara en el extremo 'inferior de una varilla metálica. Cuando la varilla se cargaba con electricidad resinosa o con electricidad vítrea, ambas pajas se cargaban con la misma clase de electricidad y se separaban una de otra. Todavía empleamos este aparato salvo que las pajas están sustituidas por ligeros panes de oro. La botella de Leyden, construida en 1745 por un grupo de científicos de la Universidad de Leyden (Holanda), estaba destinada a acumular grandes cantidades de electricidad. Estaba compuesta por una botella cilíndrica de cristal ordinario, cuyo interior y exterior estaba revestido por delgados panes de plata. Si el pan exterior está enlazado con tierra y en el interior con un cuerpo electrizado, o viceversa, la electricidad (sea vítrea o resinosa) trata de escapar al suelo pero es detenida por la capa de cristal. De este modo se acumulan en la botella grandes cantidades de electricidad y se pueden extraer chispas impresionantes conectando el interior y el exterior con un alambre. La anticuada botella de Leyden se ha desarrollado hoy en varios tipos de condensadores, que consisten en un gran número de placas metálicas, separadas por delgadas capas de aire, cristal o mica. Tales condensadores, que pueden almacenar cantidades muy grandes de electricidad, se emplean en todas las ramas de la física y electrotécnica. En particular, el primer quebrantador de átomos, construido en 1930, en la Universidad de Cambridge por John Cockroft y E. T. S. Walton, consistía en una batería de condensadores semejantes que podían ser cargados hasta un millón de voltios. Cuando Tos condensadores se descargaban a través de un tubo de cristal que contenía hidrógeno, producían "proyectiles atómicos" de una energía tan elevada que al chocar contra los átomos de un trozo de litio colocado a un extremo del tubo los rompía en dos.

Al mismo período pertenecen los trabajos del gran estadista y escritor americano Benjamin Franklin que comenzó a interesarse por la física a la edad madura de cuarenta años. No se satisfacía con las pequeñas chispas que podían ser obtenidas frotando un chanclo con una chaqueta de piel y deseaba jugar con las chispas mucho mayores que Zeus arroja desde las nubes durante las tormentas, y. estuvo enviando cometas a las nubes tormentosas para recoger electricidad de ellas. La cuerda húmeda que sostenía la cometa servía como un perfecto conductor de la

electricidad y con ella podía cargarse botellas de Leyden y obtener después chispas de ellas. Sus estudios, reunidos en el libro *Experimests and Observations os Electricity Made at Philadelphia in America* (1753) le valió el nombramiento de miembro de la Real Sociedad de Londres y de miembro asociado de la Real Academia de Ciencias de Paris. Desafiaba a Zeus en los experimentos, pero no lo hizo tan bien en la interpretación teórica de los fenómenos eléctricos porque introducía la hipótesis de un fluido eléctrico. Afirmaba que la electricidad "vítrea" era la única clase de fluido eléctrico y que los dos diferentes géneros de electrificación correspondían al exceso o a la falta de este fluido imponderable. Así pues, al cuerpo cargado con un exceso de electricidad vítrea (como una varilla de cristal frotada) le llamaba un cuerpo cargado positivamente, mientras que un cuerpo con falta de ella (como una varilla de caucho frotada) un cuerpo cargado negativamente. Cuando dos cuerpos, uno de los cuales tiene un exceso y el otro una deficiencia de fluido eléctrico (el vítreo) se juntan, la corriente eléctrica debe fluir desde el primer cuerpo, donde está en exceso, al segundo, donde falta. Estas ideas de Benjamin Franklin han llevado a la terminología moderna en la cual la corriente eléctrica va desde el electrodo positivo (ánodo) al negativo (cátodo). Sabemos ahora que la idea de Du Fay de dos fluidos eléctricos está mucho más cerca de la realidad que la de Franklin aunque la situación es mucho más complicada que to que ellos creían. Hay tanto partículas cargadas positivamente como cargadas negativamente y por cada partícula que lleva normalmente una carga positiva o negativa existe una "antipartícula" correspondiente que transporta una carga contraria. Franklin estuvo más cerca de la verdad en el caso de la corriente eléctrica en los alambres metálicos donde el transporte de electricidad es debido exclusivamente al movimiento de los electrones, excepto que los electrones transportan electricidad resinosa y no vítrea. A veces se oye decir actualmente que los nombres de electricidad positiva y negativa deben ser intercambiados de modo que la dirección convencional de la corriente de + a — coincidiera con la dirección en que se mueven los electrones. Pero si se hiciera así se producirían confusiones con los quebrantadores de átomos que disparan protones de elevada energía contra los blancos atómicos; en lugar de salir la corriente eléctrica de la boca del quebrantador de átomos fluiría en él, procedente del blanco. Y en el caso de líquidos

donde la electricidad es transportada igualmente por iones positivos y negativos que se mueven en dirección opuesta, ese cambio de terminología no nos ayudaría nada.

2. La ley de las fuerzas eléctricas y magnéticas

Durante la segunda mitad del siglo XVII, los físicos se dedicaron en muchos países a estudios cuantitativos de las fuerzas electromagnéticas. Uno de sus descubrimientos más importantes en esta línea fue el realizado por el francés Charles Augustin de Coulomb, que desarrolló la llamada "balanza de torsión" para medir fuerzas muy débiles. Este instrumento construido por Coulomb, consiste en una varilla ligera que está suspendida de un largo y delgado hilo con dos esferas equilibradas a cada extremo. Cuando no actúa ninguna fuerza sobre las esferas, la varilla toma una cierta posición de equilibrio. Si una de las esferas está cargada y en su vecindad está otra esfera cargada, la fuerza eléctrica, actuando sobre la esfera móvil, hará que la varilla gire en torno del punto de suspensión hasta que la torsión del hilo equilibre la fuerza actuante.

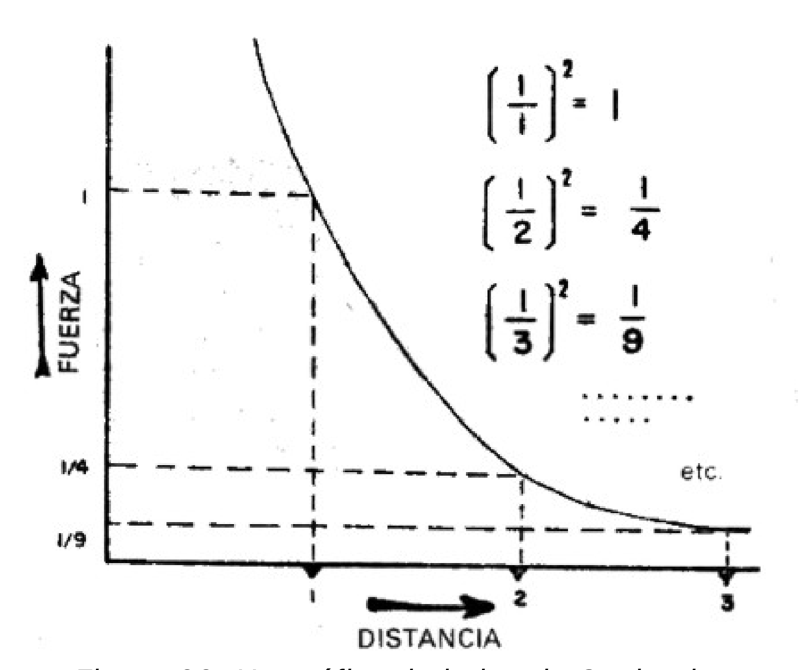


Figura 23. Un gráfico de la ley de Coulomb.

Como el hilo es muy delgado, una pequeña fuerza que actúe sobre la esfera hará que la varilla se desvíe considerablemente de su posición original, con un ángulo de

rotación proporcional a la fuerza. Cargando la esfera móvil y la inmóvil con distintas cantidades de electricidad y variando la distancia entre ellas, Coulomb descubrió la ley que lleva su nombre, según la cual las fuerzas de atracción y repulsión eléctricas son directamente proporcionales al cuadrado de las dos cargas e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia entre ellas (Figura 23). Por virtud de esta ley, se puede definir una unidad electrostática de carga como la carga que actúa con la fuerza de 1 dina sobre una carga igual situada a la distancia de 1 cm. En la práctica se emplea una unidad mucho mayor de carga eléctrica llamada coulomb, que es igual a tres mil millones de la pequeña unidad electrostática que acabamos de definir. Mediante la misma balanza de torsión y suspendiendo del hilo un imán con otro imán situado verticalmente a través del techo de la caja, Coulomb demostró que la misma ley rige para las interacciones magnéticas. Según esto, una unidad de magnetización se define como la fuerza de un polo magnético que atrae o repele, con la fuerza de 1 dina, un polo de igual fuerza situado a la distancia de 1 cm.

Hacia la misma época vivía en Inglaterra un personaje realmente solitario, llamado Henry Cavendish, hijo de un lord. No tenía amigos íntimos, se atemorizaba ante las mujeres y en su casa de Clapham Common, un barrio de Londres, ordenaba a las sirvientas que se mantuvieran fuera de su vista y les daba las órdenes para sus comidas por medio de notas que dejaba en la mesa del vestíbulo. No le gustaba la música ni arte ninguno y pasaba todo su tiempo haciendo experimentos de física y química en un laboratorio particular en su gran mansión. Su trabajo se interrumpía únicamente por los tradicionales paseos dados para conservar la salud, y por alguna asistencia ocasional a las cenas del club de la Real Sociedad para enterarse de lo que estaban haciendo otros físicos y químicos. Durante su larga vida (murió a los 79 años) sólo publicó unos cuantos trabajos relativamente sin importancia. Pero después de su muerte se encontraron un millón de libras esterlinas en su cuenta del Banco y veinte paquetes de notas en su laboratorio. Estas notas quedaron en manos de sus parientes durante mucho tiempo, pero cuando fueron publicadas cien años después, se vio que Henry Cavendish era uno de los científicos experimentales más grandes que han existido. Descubrió todas las leyes de las interacciones eléctricas y magnéticas al mismo tiempo que Coulomb y sus trabajos en química

desafían a los de Lavoisier. Además aplicó una balanza para el estudio de las fuerzas gravitatorias sumamente débiles entre los pequeños objetos y, sobre la base de estos experimentos, llegó a fijar el valor exacto de la masa de la Tierra. Ninguna unidad física lleva su nombre pero el Laboratorio Cavendish, en Cambridge, es uno de los centros mundiales de estudios científicos más famosos.

3. Una descarga de una anguila eléctrica

Los indígenas de África y Sudamérica conocían desde mucho tiempo atrás un extraño pez tropical de río que emite descargas dolorosas cuando se le intenta coger. A mediados del siglo XVIII, un barco inglés llevó varios ejemplares del pez a Londres y los biólogos comenzaron a estudiarlo. Se observó que la descarga sólo se producía cuando se tocaba la parte superior de la cabeza del pez y la parte inferior del cuerpo con una mano. Este hecho y la conmoción producida hicieron recordar el efecto de la botella de Leyden que acababa de ser inventada y el pez fue llamado *sirius electronicus* o anguila eléctrica. Cuando se demostró que el pez podía emplearse para cargar la botella de Leyden no quedó ya ninguna duda de que se trataba de una descarga eléctrica. La electricidad producida por el pez atrajo la atención del físico italiano Luigi Galvani, que estaba estudiando el fenómeno de la contracción muscular de las patas de las ranas, un manjar favorito en los restaurantes de Bolonia. Ocurrió haber observado (así lo cuenta la leyenda) que las patas de rana, colgadas de ganchos de cobre en la balaustrada de hierro de su balcón se contraían como si estuvieran vivas cuando tocaban las barras de hierro de la balaustrada. Para comprobarlo "bajo condiciones controladas", Galvani realizó un experimento, fechado en 20 de septiembre de 1786 en el diario de su laboratorio, en el cual empleaba una horquilla con un diente de cobre y otro de hierro con los cuales tocaba el nervio y el músculo de la pata de la rana. La pata se contraía rápidamente a cada toque y Galvani se convenció de que el hecho tenía alguna relación con la descarga eléctrica producida por la anguila eléctrica.

Sin embargo, estaba equivocado en esta suposición, y su amigo, el físico italiano Alejandro Volta, demostró en seguida que la corriente eléctrica que causa la contracción de la pata de la rana es un fenómeno puramente inorgánico que puede ser observado siempre que dos extremos de un alambre, hecho soldando dos

alambres de metales diferentes, se sumergen en una disolución acuosa de una sal. Volta llamó galvanismo, en honor de su amigo, a este fenómeno y construyó lo que se llama la "pila de Volta", compuesta de un gran número de rodajas alternativamente de cobre, hierro o cinc, separadas por capas de paño impregnado de una disolución salina. La pila de Volta ha sido el prototipo de todas las modernas baterías eléctricas que usamos en las lámparas de mano, flashes fotográficos y otros muchos aparatos. En marzo de 1800, Volta envió un manuscrito describiendo sus descubrimientos a la Real Sociedad de Londres que era entonces el centro internacional para el intercambio de ideas científicas. En este escrito decía:

> *El aparato de que hablo y que indudablemente le asombrará a usted no es nada más que una colección de buenos conductores de clases diferentes, dispuestos de cierta manera, 30, 40, 60 o más trozos de cobre o mejor de placa, cada uno descansando sobre un trozo de estaño o, lo que es mucho mejor, de cinc y un número igual de capas de agua o de algún otro fluido que sea mejor conductor que el agua pura, tal como agua salada, lejía, etc., o trozos de cartón, cuero, etc., bien empapados con estos líquidos; estas capas interpuestas entre cada par o combinación de diferentes metales, en sucesión alternativa y siempre en el mismo orden, de estas tres clases de conductores, esto es todo lo que constituye mi nuevo instrumento que, como he dicho, imita los efectos de las botellas de Leyden o baterías eléctricas produciendo las mismas descargas que ellas, lo que en realidad queda muy por debajo de la actividad de las citadas baterías cargadas en alto grado en cuanto se refiere a la fuerza y el ruido de las explosiones, la chispa y la distancia a la que tiene lugar la descarga, etc., igualando únicamente los efectos de una batería cargada a bajo grado, de una batería que tiene una capacidad inmensa, pero la cual, al mismo tiempo, sobrepasa infinitamente la virtud y el poder de estas mismas baterías, puesto que no necesitan ser cargadas anteriormente por medio de electricidad exterior y puesto que son capaces de producir una descarga siempre que son tocadas, por frecuentes que sean estos contactos... Doy a usted una descripción más detallada de este aparato y de otras disposiciones similares, así como de los experimentos más notables relacionados con él.*

Entonces ocurre una cosa infortunada. Los señores Carlisle y Nicholson, que tenían a su cargo las publicaciones de la Real Sociedad, dejaron de lado el manuscrito, repitieron los experimentos de Volta y publicaron los resultados como suyos. Pero la superchería no sirvió de nada. Los resultados de las investigaciones de Volta fueron conocidos por otros caminos, y Carlisle y Nicholson acusados de plagiarios y relegados al olvido. Y hoy la pila de Volta y el voltio, una unidad de potencial eléctrico, conmemoran el nombre del talentoso científico italiano. El potencial eléctrico caracteriza el grado de electrización de los cuerpos cargados. Supongamos que tenemos un gran conductor esférico cargado con cierta cantidad de electricidad y deseamos aumentar esta carga. Esto puede conseguirse sosteniendo con un mango aislador una pequeña esfera metálica que está cargada con una cierta cantidad de electricidad a alguna distancia de la esfera mayor (teóricamente a una distancia infinita) y poniéndola en contacto con ella. A causa de la repulsión de Coulomb entre las dos esferas habrá que realizar cierto trabajo para ponerlas en contacto. El trabajo que ha de ser efectuado para aumentar la carga de la esfera mayor en una unidad de electricidad es lo que se llama su potencial eléctrico. Si la carga eléctrica se mide en culombios y el trabajo en julios, el potencial eléctrico se medirá en voltios.

4. Electromagnetismo

Aunque los primeros investigadores de los fenómenos eléctricos y magnéticos tuvieron que haber presentido que había alguna relación profunda entre ellos, no pudieron establecerla. Las cargas eléctricas no influyen en absoluto sobre los imanes, ni los imanes influyen sobre las cargas eléctricas. El honor de haber descubierto el puente entre la electricidad y el magnetismo corresponde al físico danés Hans Christian Oersted que, habiendo oído hablar de la obra de Volta, construyó una pila eléctrica de su propia invención y efectuó diversos experimentos con ella. Un día del año 1820, cuando se dirigía a dar su lección en la Universidad de Copenhague, Oersted tuvo una idea. Si la electricidad estática no afecta a los imanes de ningún modo, acaso las cosas sean distintas si se hace la prueba con electricidad que se mueva a lo largo de un alambre que conecta los dos polos de la

pila de Volta. Al llegar al aula atestada de jóvenes estudiantes, Oersted colocó en la mesa su pila Volta, conectó los dos extremos opuestos con un alambre de platino y situó una aguja de brújula a poca distancia. La aguja, que se suponía que siempre se orientaba en la dirección Norte-Sur giró y se quedó quieta en la dirección perpendicular al alambre. El público no se impresionó, pero Oersted sí. Después de su lección permaneció en el aula tratando de comprobar el insólito fenómeno que acababa de descubrir. Primero pensó que el movimiento de la brújula podría haber sido producido por las corrientes de aire procedentes del alambre calentado por la corriente eléctrica. Para comprobarlo situó un trozo de cartón entre el alambre y la brújula para detener las corrientes de aire. Pero no observó ninguna diferencia. Después hizo girar la pila de Volta 180 grados de modo que la corriente en el alambre fluyera en la dirección contraria. La aguja también giró 180 grados y su polo norte señalaba ahora en la dirección en que antes estaba el polo sur. Para Oersted no cabía duda de que existía una interacción entre los imanes y la electricidad es movimiento y que la dirección en que la brújula se orientaba dependía de la dirección en que corría la electricidad por el alambre.
Escribió todos los hechos y las observaciones relativas a este descubrimiento y envió el artículo para su publicación a la revista francesa Annales des Chimie et de Physique. El artículo apareció a fines de 1820 con la siguiente nota de los editores:

> *Los lectores de los Annales deben haberse dado cuenta de que no apoyamos demasiado apresuradamente los anuncios de descubrimientos extraordinarios*[17] *y hasta ahora no hemos podido más que congratularnos de esta política. Pero en relación con el artículo del señor Oersted, los resultados por él obtenidos, por singulares que parezcan, están acompañados de demasiados detalles para que se pueda suscitar la menor sospecha de error.*

¡Así el electromagnetismo, como Oersted lo llamó, llegó a ser realidad!
Cuando llegó a Paris la noticia del descubrimiento de Oersted atrajo la atención del físico y matemático francés André Marie Ampère que, en el transcurso de unas cuantas semanas, encontró que no sólo una corriente eléctrica actúa sobre una aguja magnética, sino que también dos corrientes actúan una sobre otra,

---

[17] Probablemente porque eran la obra de chiflados.

produciéndose una atracción entre dos alambres paralelos que transportan corrientes eléctricas en el caso de que las corrientes vayan en la misma dirección y una repulsión si las direcciones de las dos corrientes son contrarias. Demostró también que una espiral de alambre de cobre que puede girar libremente en torno de un eje vertical se orienta en la dirección Norte-Sur si la corriente sigue la misma dirección que la aguja de la brújula y que dos espirales o bobinas interactúan una sobre otra de la misma manera que dos varillas imanadas. Esto le llevó a la idea de que el magnetismo natural es debido a una corriente eléctrica que corre dentro de los cuerpos magnetizados, e imaginó que cada molécula de materiales magnéticos contiene dentro de sí una corriente circular, representando un pequeño electroimán. Cuando el material no está magnetizado, los distintos electroimanes de las moléculas están orientados al azar en todas direcciones y el resultado neto es cero. En los cuerpos magnetizados, los imanes moleculares están orientados, al menos parcialmente, en una dirección, produciendo de este modo su atracción o repulsión magnética. Estas ideas de Ampère han sido plenamente confirmadas por los físicos modernos que consideran que las propiedades magnéticas de los átomos y moléculas son debidas a electrones que giran en torno al núcleo o giran rápidamente en torno a sus propios ejes.

Por haber sido Ampère el primero en formular claramente la idea de la corriente eléctrica como el movimiento de la electricidad a lo largo del alambre, la unidad de corriente eléctrica lleva su nombre. Un amperio se define como la corriente que transporta 1 culombio por segundo a través de la sección transversal de un alambre.

Gran científico por sus descubrimientos fue también un ejemplo clásico del profesor distraído. Se dice que durante sus lecciones usaba frecuentemente el trapo con que limpiaba la tiza de la pizarra para sonarse la nariz y se cuenta que una vez, paseando por las calles de Paris, tomó la carrocería de un "simón" por una pizarra y comenzó a escribir fórmulas matemáticas en ella. Cuando el "simón" comenzó a andar lo siguió corriendo decidido a terminar sus cálculos. Una vez, cuando Napoleón Bonaparte visitó la Academia de Paris, Ampère no le reconoció y Napoleón le dijo sonriendo: "Ya ve usted, señor, qué inconveniente es no ver frecuentemente a los colegas. Yo nunca le veo tampoco en las Tullerías pero yo sé cómo obligarle a

ir, al menos a decirme buenos días". Y le invitó a cenar en Palacio al día siguiente. Pero al día siguiente la silla en la mesa del comedor de palacio estaba vacía: Ampère había olvidado la invitación.

5. Las leyes del circuito eléctrico

Mientras Ampère se interesaba casi exclusivamente en los efectos magnéticos asociados con las corrientes eléctricas, el físico alemán George Simon Ohm, que era por entonces maestro de escuela en Colonia, trataba de ver en qué medida la fuerza de la corriente eléctrica depende del material del alambre por donde corre y el potencial eléctrico que la mantiene corriendo. Para ello empleaba una serie de pilas de Volta que, conectadas en serie, producían varios grados de tensión eléctrica, y un galvanómetro, construido primeramente por Ampère, que medía la fuerza de la corriente eléctrica por la desviación que producía en la aguja magnética. Por el empleo de alambres de diferentes longitudes y diferentes secciones transversales encontró que la fuerza de la corriente es directamente proporcional a la sección transversal del alambre, inversamente proporcional a su longitud y depende del material de que está hecho. Asimismo encontró que para un alambre dado la fuerza de la corriente es proporcional a la diferencia de potenciales eléctricos entre los dos extremos, dados por el número de pilas de Volta conectadas en serie que impulsan la corriente a través del alambre. La situación es completamente análoga al caso en que se bombea agua a través de una cañería llena de alguna clase de fibra de cristal que resiste el libre paso del líquido. En este caso, también la fuerza de la corriente de agua aumentará con la presión suministrada por la bomba y con la sección transversal de la cañería, decrecerá con la longitud de esta y dependerá de la naturaleza y cantidad de material metido en la cañería que se opone al libre paso del agua[18].

De este modo, Ohm introdujo el concepto de la resistencia eléctrica de los diferentes alambres, declarando que: la fuerza de la corriente es directamente proporcional a la diferencia de los potenciales eléctricos que originan la corriente e inversamente proporcional a la resistencia del alambre, la cual, a su vez, depende

---

[18] Esta analogía es completamente compatible con las opiniones modernas acerca de la corriente eléctrica en los alambres metálicos; según ellas, la corriente es producida por un flujo de los llamados electrones libres que se abren su camino bajo la acción de la tensión eléctrica a través de los apretados átomos que forman el metal.

de su material, y es directamente proporcional a su sección transversal e inversamente proporcional a su longitud. Ohm publicó sus descubrimientos en 1827 en un artículo titulado "El circuito galvánico investigado matemáticamente", que puso los fundamentos para todos los estudios posteriores de los circuitos eléctricos.
La ley de Ohm puede ser expresada por dos fórmulas sencillas:

$$fuerza\ de\ la\ corriente = \frac{deferencia\ de\ potencial\ eléctrico}{resistencia\ del\ alambre}$$

$$resistencia\ del\ alambre = C\,\frac{sección\ transversal\ del\ alambre}{longitud\ del\ alambre}$$

en donde C es una constante característica para el material empleado.
En su honor, la unidad de resistencia eléctrica se llama 1 ohmio, y es la resistencia que produce una corriente de 1 amperio bajo la diferencia de potencial eléctrico de 1 voltio. A veces, en lugar de resistencia eléctrica, se habla de conductibilidad eléctrica que es exactamente lo inverso. Y con bastante propiedad, la unidad de conductibilidad eléctrica se llama *mho*, es decir, lo inverso de *ohm*.

6. Descubrimientos de Faraday

Michael Faraday, que llevó los estudios clásicos sobre los fenómenos eléctricos y magnéticos a su cima y abrió una nueva era que ahora llamamos "física moderna", nació en 1791, cerca de Londres, en la familia de un herrero. Su familia era demasiado pobre para sostenerlo en la escuela y a la edad de 13 años entró como recadero en una librería propiedad de un tal Mr. Riebau. Un año después, Mr. Riebau le tuvo de aprendiz de encuadernador por un plazo de siete años. Faraday no sólo encuadernaba los libros que llegaban a la librería sino que leía muchos, desde la primera a la última página, que estimularon en él un ardiente interés por la ciencia. Faraday escribió sobre su juventud:

> *Mientras fui aprendiz me gustaba leer los libros científicos que caían en mis manos y entre ellos me deleitaba con las Conversaciones de Química de Marcel y los artículos sobre electricidad de la Enciclopedia Británica. Hice los experimentos sencillos que podían ser costeados por unos cuantos peniques a*

la semana y de este modo construí una máquina eléctrica, primero con un frasco de cristal y después con un verdadero cilindro así como otros aparatos eléctricos de clase análoga.

Durante el último año de su aprendizaje, cuando acababa de cumplir los 20 años (y cuando los descubrimientos de Galvani y Volta eran todavía noticias recientes) escribió a su viejo amigo Benjamin Abbott:

Últimamente he realizado unos cuantos experimentos galvánicos para aclararme a mí mismo los primeros principios de la ciencia. Yo fui a los Knight para obtener algún níquel y pensé que tendrían cinc maleable. Me enteré y compré algo ¿ha visto usted alguno todavía?—. La primera porción que obtuve era de los trozos más delgados posibles y de forma plana. Según me informaron era bastante delgado para la varilla eléctrica o, como antes la llamé, la columna eléctrica de De Luc. Mi propósito era hacer discos, con los cuales y cobre formar una pequeña batería. La primera que terminé ¡contenía el número inmenso de siete pares de discos, cada uno del inmenso tamaño de medio penique!

Yo, señor, corté por mí mismo siete discos del tamaño de medios peniques cada uno, los cubrí con siete medios peniques e interpuse siete, mejor dicho seis, trozos de papel empapados en una solución de clorhidrato de sodio. Pero no se siga riendo, mi querido Abbott, más bien sorpréndase del efecto producido por este trivial aparato. Fue suficiente para producir la descomposición del sulfato de magnesio —un efecto que me sorprendió sumamente, porque no tenía ni podía tener idea de que este agente fuera capaz de este resultado—. Entonces se me ocurrió una idea; voy a decírsela. Puse en comunicación la parte inferior y superior de la pila y la solución mediante un alambre de cobre. ¿Pensará usted que era el cobre lo que descomponía el sulfato terroso, la parte sumergida en la solución? De que se había producido un fenómeno galvánico estaba seguro, porque ambos alambres se cubrieron en poco tiempo de burbujas de algún gas y una corriente continua de burbujas, parecidas a pequeñas partículas, corrían a través de la solución desde el alambre negativo. Mi prueba de que el sulfato

> *se había descompuesto fue que, al cabo de dos horas, la solución antes clara se hizo turbia: el magnesio estaba suspendido en ella.*

Este fue el descubrimiento de la descomposición química por medio de la corriente eléctrica o electrolisis, como la llamó Faraday. Durante los años siguientes en que Faraday trabajó sobre este fenómeno descubrió dos leyes fundamentales que llevan su nombre. La primera ley de Faraday dice que: *para una dada solución la cantidad de material depositado (o liberado) sobre los electrodos es proporcional a la cantidad total de electricidad (es decir, la fuerza de la corriente multiplicada por el tiempo) que pasa a través de la solución.*

Esto significa que las moléculas cargadas (que después se llamaron iones) que transportan la electricidad a través de las soluciones líquidas tienen una carga eléctrica exactamente definida (Figura 24).

Conforme a la segunda ley de Faraday: *los iones monovalentes de sustancias diferentes transportan también igual cantidad de electricidad mientras que los iones bi-tri-etc.-valentes transportan cargas correspondientemente mayores.*

Esto demuestra la existencia de una unidad universal de carga eléctrica que, en la época de Faraday, se consideraba que únicamente estaba adherida a los distintos átomos, Pero después ha sido detectada en la forma de electrones libres que fluyen a través del espacio.

Pero, después de descubrir la electrolisis, Faraday tuvo que andar buscando un empleo porque su colocación en la librería expiraba a los pocos meses. Su aspiración era trabajar con Sir Humphry Davy, el famoso químico, a cuyas lecciones Faraday había asistido durante su aprendizaje. Transcribía caligráficamente sus notas sobre las conferencias de Davy, añadiéndoles dibujos ejecutados de mano maestra, y las envió en un volumen elegantemente encuadernado a Sir Humphry con una petición de empleo en su laboratorio. Cuando Davy pidió el consejo de uno de los gobernadores de la Real Institución de Gran Bretaña, de la cual era director, sobre el empleo de un joven encuadernador, el hombre le dijo: "*Dejadle que lave botellas. Si es algo bueno aceptará el trabajo; si lo rechaza es que no es bueno para nada.*"

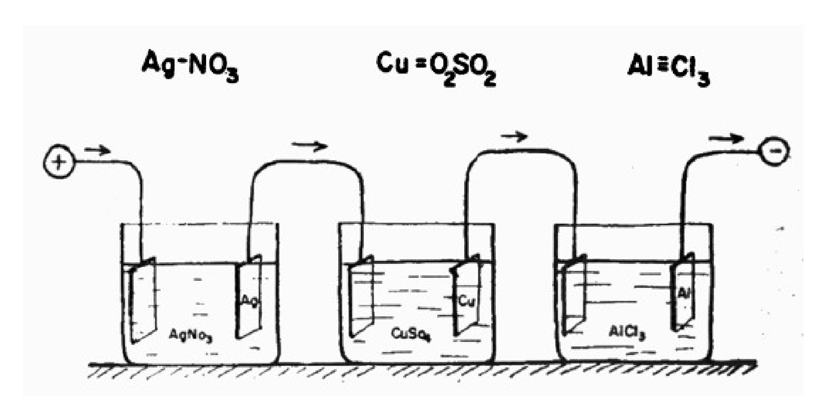


Figura 24. Demostración de las leyes de la electrolisis de-Faraday. Si se hace pasar una corriente eléctrica a través de soluciones de nitrato de plata, sulfato de cobre y cloruro de aluminio, los metales se depositan en los electrodos negativos. La cantidad de metales depositados es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa a través de las soluciones (primera ley de Faraday). También se ha visto que si la cantidad de plata depositada es de 108 gramos (peso atómico de la plata), la cantidad de cobre depositado es sólo de 31,7 gramos (la mitad del peso atómico del cobre) y la cantidad de aluminio depositado es sólo de q gramos (un tercio del peso atómico del aluminio). Como la misma cantidad de electricidad pasa a través de los tres vasos, se deduce que el ión de cobre transporta el doble de la carga eléctrica transportada por el átomo de plata, y el ión de aluminio transporta tres veces más. Esto coincide con la equivalencia química de los tres metales, como se ve en las fórmulas que figuran en la parte superior del diagrama. Esta es la segunda ley de Faraday.

Faraday aceptó y permaneció en la Real Institución durante los cuarenta y cinco años restantes de su vida, primero como ayudante de Davy, después como su colaborador y, por último, a la muerte de Davy, como sucesor suyo.

Aparte de numerosas publicaciones en las revistas científicas, el documento más notable relativo a sus estudios es su *Diario*, que llevó sin interrupción desde el año 1820 al 1862. Recientemente (en 1932) fue publicado por la Real Institución en siete gruesos volúmenes con un total de 3.236 páginas con unos miles de dibujos marginales. Citemos de este *Diario* la descripción, con las propias palabras de Faraday, de su descubrimiento, probablemente más importante: el de la *inducción electromagnética*.

Agosto 29, 1831

1. *Experimentos sobre la producción de electricidad por el magnetismo, etc.*

2. *Tengamos un anillo de hierro (hierro dulce) hecho de hierro redondo y 7/8 pulgadas de grueso, siendo el anillo de 6 pulgadas en su diámetro exterior. Enrollemos varias espirales de alambre de cobre en torno de una mitad, estando las espirales separadas por hilo y algodón calicó —eran tres trozos de alambres, cada uno de 24 pies de largo que podían ser conectados para formar uno solo o ser empleados como trozos separados—. Para el experimento con una cubeta, cada uno fue aislado del otro. A este lado del anillo lo llamamos A. En el otro lado, pero separados por un intervalo, fue enrollado el alambre en dos trozos juntos con una longitud de 60 pies, y en la misma dirección que las anteriores espirales; este lado lo llamamos B.*
3. *Cargamos una batería de 10 pares de placas de 4 pulgadas cuadradas. Se enrolló sobre el lado B una espiral y se conectaron sus extremos por un alambre de cobre que pasa a cierta distancia y precisamente sobre una aguja magnética (a 3 pies del anillo de hierro). Entonces conectamos los extremos de una de las piezas del lado A con la batería; inmediatamente se nota un efecto en la aguja. Esta oscila y se sitúa al fin en su posición original. Interrumpiendo la conexión del lado A con la batería, otra vez una perturbación en la aguja.*

Así, la corriente eléctrica en una espiral puede inducir una corriente en otra espiral situada cerca, del mismo modo que una carga eléctrica induce la polarización eléctrica de otro cuerpo cercano. Pero, mientras en el caso de la polarización eléctrica el efecto es estático y dura tanto como los dos cuerpos permanezcan cerca uno de otro, la inducción de la corriente eléctrica es un proceso dinámico, y la corriente en la segunda bobina persiste únicamente de cero a su valor normal o disminuye desde este valor a cero.

Menos de tres meses después de la fecha de este importante descubrimiento que abrió una nueva época, Faraday dio otro paso importante en sus estudios sobre la relación entre electricidad y magnetismo. He aquí cómo fue realizado, según dice su *Diario*:

Oct. 17, 1831.

56. Construido un cilindro hueco de papel, cubierto con 8 hélices de alambre de cobre en la misma dirección con las siguientes cantidades:

	Pies	Pulgadas
1 ó la más externa	*32*	*10*
2	*31*	*6*
3	*30*	
4	*28*	
5	*27*	
6	*25*	*6*
7	*23*	*6*
8 ó más interior	*22*	

220 pies con exclusión de los extremos salientes, todas separadas por hilo y calicó. El diámetro interno del cilindro de papel era 13/16 de pulgada; el diámetro externo del conjunto 1 1/2 pulgadas y la longitud de las hélices de cobre (como un cilindro) 6 1/2 pulgadas.

57. Experimentos con O. Los 8 extremos de las hélices en un extremo del cilindro fueron limpiados y atados juntos como un manojo. Lo mismo con los otros 8 extremos. Estos extremos conjuntos fueron conectados con el galvanómetro mediante largos alambres, después con una varilla magnética cilíndrica de 3/4 pulgadas de diámetro y 8 1/2 pulgadas de longitud tenía un extremo inserto precisamente en el extremo del cilindro de las hélices—; después, la varilla magnética fue introducida rápidamente en toda la longitud y la aguja del galvanómetro se movió; después, al sacar la varilla la aguja se movió otra vez, pero en la dirección contraria. Este efecto se repitió toda las veces que el imán fue introducido o sacado, por tanto, una onda de electricidad fue producida de esta manera por la simple aproximación de un imán y no por su formación in situ.

58. La aguja no quedó desviada, sino que volvió a su posición todas las veces. El orden de los movimientos fue inverso que en los anteriores experimentos: los movimientos eran en la dirección semejante a los anteriores experimentos; es

decir, la aguja indicadora tendía a situarse paralelamente al imán excitador estando en el mismo lado del alambre y los polos del mismo nombre en la misma dirección.

59. *Cuando con las 8 hélices formé una larga hélice, el efecto no fue tan fuerte sobre el galvanómetro como antes; probablemente ni la mitad, así es mejor en trozos y combinados por los extremos.*
60. *Cuando sólo se usaba una de las 8 hélices era menos potente, apenas sensible.*

Aquí, de nuevo, la inducción de la corriente eléctrica en la bobina era un fenómeno dinámico y la corriente sólo existía mientras el imán era metido o sacado de la bobina. En la época de Faraday la idea de que el magnetismo debía producir electricidad lo mismo que la corriente eléctrica produce magnetismo estaba en el aire y muchos físicos intentaron observar este efecto, pero despistados por la analogía con la inducción electroestática, ensayaron únicamente las configuraciones estáticas de imanes y alambres, tales como una varilla imanada con un alambre arrollado a su alrededor, que se negaba obstinadamente a producir alguna chispa cuando se unían los dos extremos. Al genio de Faraday o acaso a la enorme cantidad de experimentación que realizó día tras día, se debe haber hecho evidente que la producción de una corriente eléctrica es un proceso dinámico y requiere, bien un cambio en la fuerza de otra corriente, bien un cambio en la posición del imán. El único físico que tuvo la misma idea fue el americano llamado Joseph Henry, pero vaciló en anunciarlo tanto tiempo que la prioridad del descubrimiento fue para el hombre del otro lado del Atlántico.

La mente investigadora de Michael Faraday no se contentó con revelar la relación oculta entre magnetismo y electricidad. Quería también saber si los imanes afectaban los fenómenos ópticos. Esto culminó con el descubrimiento de la rotación del plano de polarización de la luz cuando pasa a través de materias transparentes situadas en un campo magnético. Dejemos al propio Faraday relatamos este descubrimiento:

13 Sept. 1845.

7498. Hoy he trabajado con líneas de fuerza magnética, pasando a través de diferentes cuerpos (transparentes en diferentes direcciones) y al mismo tiempo pasando un rayo polarizado de luz a través de ellos y después examinando el rayo por el prisma de Nichol u otros medios. Los imanes eran electroimanes, uno de ellos nuestro gran cilindro electromagnético y el otro un núcleo de hierro puesto en la hélice sobre un marco: esto no fue tan fuerte como el anterior. La corriente de 5 células de la batería de Grove fue enviada a través de ambas hélices a la vez y los imanes fueron imanados y desimanados haciendo correr o deteniendo la corriente eléctrica.

Después de describir varios resultados negativos en los cuales el rayo de luz pasaba a través del aire y otras sustancias, Faraday consigna el mismo día:

7504. Vidrio pesado. Un trozo de vidrio pesado de 2 por 1,8 pulgadas y de una pulgada de grueso, de silicoborato de plomo pulimentado por los dos bordes más cortos fue experimentado. No produjo efectos cuando los mismos polos magnéticos o los polos contrarios estaban en lados opuestos (respecto a la trayectoria del rayo polarizado) ni cuando los mismos polos estaban en el mismo lado, fuera constante o intermitente la corriente. Pero cuando los polos magnéticos contrarios estaban en el mismo lado había un efecto producido sobre el rayo polarizado y de esta manera quedó comprobado que la fuerza magnética y la luz están: relacionadas entre sí. Este hecho probablemente será sumamente fecundo y de gran valor en la investigación de ambas clases de fuerzas naturales.

¡Y lo fue ciertamente! El "efecto Faraday", es decir, la rotación del plano de polarización de luz que se propaga a lo largo de las líneas magnéticas demuestra la íntima relación entre las ondas de luz, que son ondas electromagnéticas muy cortas, y las corrientes eléctricas dentro de los átomos individuales. Estos pequeños circuitos eléctricos, cuya existencia fue sugerida por Ampère, son interpretados actualmente como la rotación de electrones atómicos en torno del núcleo central. Consideremos dos átomos idénticos situados en un campo magnético de tal manera

que un electrón circula en la dirección de las agujas del reloj y el otro en dirección contraria. En un caso, el campo magnético ejercerá sobre el electrón en movimiento una fuerza dirigida hacia el núcleo, mientras en el otro caso la fuerza se ejercerá en dirección contraria. Así, en el primer caso, el diámetro de la órbita del electrón disminuirá y la frecuencia de rotación aumentará, mientras en el segundo caso ocurrirá lo contrario. Esta diferencia de comportamiento entre las corrientes intra-atómicas en la dirección de las agujas de un reloj y en la opuesta afectará la propagación de las ondas electromagnéticas (luz) a través del material y puede demostrarse que el resultado será la rotación del plano de polarización observado por Faraday.

Persuadido de que todos los fenómenos observados en el mundo físico están relacionados entre sí, Faraday intentó también establecer una relación entre las fuerzas electromagnéticas y las fuerzas de la gravitación newtoniana. En 1849 escribió en su *Diario*:

Gravedad. Seguramente esta fuerza debe ser capaz de una relación experimental con la electricidad, el magnetismo y otras fuerzas, de manera que se establezca su acción recíproca y efecto equivalente. Considerar por un momento cómo tratar de abordar esta materia con hechos y ensayos.

Pero los numerosos experimentos que emprendió para descubrir tal relación fueron infructuosos y concluyó esta parte del *Diario* con estas palabras:

> *Aquí terminan mis tentativas por el momento. Los resultados son negativos. Pero no por esto vacila mi fuerte impresión de que existe una relación entre la gravedad y la electricidad, aunque no haya comprobado que existe tal relación*.

Un siglo después, otro genio estuvo rompiéndose la cabeza durante muchas décadas en el intento de desarrollar la llamada "teoría del campo unificado" que uniría los fenómenos electromagnéticos y gravitatorios. Pero, lo mismo que Faraday, Albert Einstein murió sin haber podido conseguirlo.

7. Campo electromagnético

Por impresionantes que fueran los descubrimientos experimentales de Faraday, fueron igualados por sus ideas teóricas. A causa de su poca instrucción y sin haber conocido prácticamente las matemáticas, Faraday no pudo ser lo que habitualmente se llama un físico teórico. Pero el hecho es que para tener una concepción teórica de un fenómeno físico embrollado es absolutamente necesario muy a menudo un conocimiento de las complicadas matemáticas y a veces también perjudicial. El investigador se puede perder fácilmente en la selva de las intrincadas fórmulas y, como dice un proverbio ruso, "*los árboles no dejan ver el bosque*". Antes de Faraday, se solía considerar que las fuerzas eléctricas y magnéticas, lo mismo que las gravitatorias actuaban a través del espacio vacío que separaba los objetos que estaban en acción recíproca. A esta mente sencilla, sin embargo, tal "*acción a distancia*" no le parecía tener sentido físico y viendo como un peso se movía de un sitio a otro deseaba ver también la cuerda que tirase de él o el palo que lo empujase. Así, para explicar las fuerzas que actúan entre las cargas eléctricas y los imanes, tuvo que imaginar que el espacio intermedio estaba lleno de "algo" que podía tirar o empujar. Hablaba de algo análogo a tubos de caucho que se extienden entre dos cargas eléctricas o polos magnéticos contrarios y tirando de ellas las reúnen. En el caso de cargas o polos del mismo signo los tubos actúan de diferente manera y los empujan separándolos. La dirección de estos tubos de Faraday en el caso del magnetismo puede ser detectada esparciendo limaduras finas de hierro sobre una lámina de vidrio sobre la cual se ha colocado un imán. Las limaduras quedan magnetizadas y se orientan por sí mismas en la dirección de las fuerzas magnéticas que actúan a lo largo de los tubos, produciendo dibujos. En el caso de un campo eléctrico se pueden obtener resultados similares empleando la polarización eléctrica, pero el experimento es más difícil de realizar. Según Faraday, los tubos eléctricos y magnéticos son también responsables de varios fenómenos electromagnéticos. Cuando una corriente fluye a través de un alambre eléctrico, queda rodeada de tubos circulares que ejercen una tensión sobre la aguja magnética orientándola de manera adecuada. Cuando un alambre conductor se mueve respecto a un imán (o viceversa) atraviesa los tubos magnéticos y como resultado es inducida una corriente.

Estas ideas de Faraday eran en cierto modo más bien ingenuas y cualitativas en alto grado, pero abrieron una nueva época en el desarrollo de la física. Las misteriosas fuerzas que actuaban a largas distancias entre los cuerpos fueron sustituidas por "algo" distribuido continuamente por todo el espacio entre y en torno a ellos, algo a lo que podía atribuirse un determinado valor en cualquier punto. Estas ideas introdujeron en la física la idea de "campo de fuerzas" o simplemente "campo" en el caso de interacciones eléctricas, magnéticas o gravitatorias. Las fuerzas entre objetos separados por espacios vacíos pueden ser ahora consideradas como el resultado de interacciones inmediatas entre los campos que los rodean.

El trabajo de dar a las ideas de Faraday una formulación matemática cuantitativa fue realizado por el famoso escocés, James Clerk Maxwell, nacido en Edimburgo dos meses después de haber anunciado Faraday su descubrimiento de la inducción electromagnética. Al contrario que Faraday, Maxwell era un gran matemático. A sus diez años fue a la escuela en la Academia de Edimburgo donde se vio obligado a consagrar gran parte de su tiempo en el estudio de los verbos griegos irregulares y otras ramas de las "ciencias humanísticas". Pero prefería las matemáticas, y su primer éxito en ellas fue, según sus propias palabras, "*hacer un tetraedro, un dodecaedro y otros dos edros cuyos nombres no conocía*". A la edad de catorce años ganó la medalla de matemáticas de la Academia por unas notas mostrando cómo se podía construir una curva oval perfecta mediante alfileres y un hilo. Pocos años después Maxwell presentó a la Real Sociedad dos informes "*Sobre la teoría de las curvas onduladas*" y "*Sobre el equilibrio de los cuerpos elásticos*". Los dos informes fueron leídos ante la Sociedad por otro "*a causa de que no se consideraba propio de un muchacho de blusa subir a la tribuna*". En 1850, a sus diecinueve años, Maxwell ingresó como estudiante en la Universidad de Cambridge, tomó su grado cuatro años después y en 1856 fue nombrado para la cátedra de Filosofía Natural del Marischal College en Aberdeen, donde permaneció hasta que fue llamado a Cambridge como director del Laboratorio Cavendish recientemente creado por entonces.

Aunque primeramente su interés se concentraba en el campo de las matemáticas puras no tardó en interesarse por la aplicación del método matemático a distintos problemas de la física, haciendo importantes contribuciones a la teoría cinética del

calor (véase el Capítulo 4), pero, sin duda, su obra más importante fue la formulación matemática de las ideas de Faraday relativas a la naturaleza y leyes del campo electromagnético. Generalizando el hecho empírico de que el cambio de los campos magnéticos inducen fuerzas electromotrices y corrientes eléctricas en los conductores, mientras que los campos eléctricos cambiantes y las corrientes eléctricas producen campos magnéticos, escribió las famosas ecuaciones que llevan su nombre, que relacionan el valor del cambio del campo magnético con la distribución espacial del campo eléctrico y viceversa. Mediante las ecuaciones de Maxwell y conociendo la distribución de los cuerpos magnetizados, conductores cargados y corrientes eléctricas, se puede calcular con todo detalle el campo electromagnético que los rodea y sus cambios en el tiempo. Maxwell ha demostrado que, aunque los campos eléctricos y magnéticos están por lo general "anclados", adheridos en los cuerpos magnetizados y cargados de electricidad, también pueden existir y propagarse por el espacio en forma de ondas electromagnéticas libres. Para aclarar este punto consideremos dos conductores esféricos, uno cargado con electricidad positiva y otro con electricidad negativa. En el espacio que rodea estas dos esferas existe un campo eléctrico estático que almacena la energía eléctrica de las cargas aproximadamente como un muelle enrollado apretadamente almacena la energía mecánica. Si conectamos dos alambres unidos a ambas esferas, la corriente eléctrica comienza a fluir de una esfera a otra y sus cargas eléctricas y el campo eléctrico que las rodea comenzará a disminuir rápidamente hasta que por último desaparece. Sin embargo, la corriente eléctrica, fluyendo a través del alambre, produce un campo magnético a su alrededor y en el momento en que el campo eléctrico magnético disminuye a cero, toda la energía del sistema queda almacenada en su campo magnético. Pero el proceso no termina aquí y la corriente eléctrica continúa fluyendo en el alambre, aunque con intensidad decreciente, volviendo a cargar las dos esferas con electricidad de signos contrarios. La energía del campo magnético se convierte otra vez en la energía del campo eléctrico y, por fin, llegamos a una fase con corriente cero y las dos esferas cargadas con las primitivas cantidades de electricidad pero de signo contrario. Ahora el proceso comienza de nuevo, pero en la dirección opuesta y las oscilaciones eléctricas continúan en una y otra dirección hasta que la gradual pérdida de energía, debida al

calentamiento del alambre que transporta la corriente, las detiene. La situación es muy similar a la del péndulo en el cual la energía cinética del movimiento en el centro de cada oscilación se convierte en energía potencial en los dos extremos.
Mediante sus ecuaciones, Maxwell pudo probar que el campo electromagnético oscilante del tipo que acabamos de describir se propaga a través del espacio que circunda al oscilador en la forma de ondas que transportan energía. Como las líneas de fuerza están en el plano que pasa a través del alambre, mientras que las líneas magnéticas son perpendiculares a él, los vectores eléctrico y magnético de la onda propagada son perpendiculares entre sí lo mismo que a la dirección de la propagación. La existencia de estas ondas fue confirmada experimentalmente en 1888 por el físico alemán Heinrich Hertz poco después de haberlas predicho Maxwell y condujo al desarrollo de la técnica de la radiocomunicación que actualmente representa una de las mayores ramas de la civilización industrial.
Queremos exponer ahora con algún detalle uno de los puntos importantes de la teoría de Maxwell: el cálculo de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. Al considerar la interacción de los campos eléctricos y magnéticos, nos encontramos con la cuestión relativa a las unidades que deben ser empleadas para medir las distintas cantidades electromagnéticas. Hemos visto antes que la unidad de carga eléctrica se define como la carga que repele una carga igual situada a la distancia de 1 cm con la fuerza de 1 dina. De manera análoga la unidad del campo eléctrico debe ser definida como el campo que actúa con fuerza de 1 dina sobre una unidad de carga eléctrica situada en él. La unidad de polo magnético y la unidad de campo magnético se definen de modo análogo. Pero ¿qué ocurre si consideramos el fenómeno que implica a la vez electricidad y magnetismo, por ejemplo, un campo magnético producido por una corriente eléctrica?
Supongamos que investigamos la acción de la corriente eléctrica sobre un polo magnético situado a 1 cm del alambre. Podemos definir la unidad de corriente eléctrica cómo una corriente que transporta por segundo la unidad de carga eléctrica antes definida. Pero si lo hacemos así, la fuerza con la cual el campo magnético producido por esta corriente actúa sobre una unidad de polo situada a 1 cm no será necesariamente. de 1 dina y, en verdad, ni con mucho.

Alternativamente podemos definir una unidad de corriente como una corriente que produce un campo magnético que actúa con la fuerza de 1 dina sobre una unidad de polo situada a 1 cm. Pero si así lo hacemos, la cantidad de electricidad que corre transportando una unidad de corriente eléctrica por el alambre, no será igual a la unidad electrostática de carga antes definida. En lugar de escoger una definición posible y rechazar la otra, los físicos prefieren emplear ambas, introduciendo un factor constante para traducir un sistema de unidades en el otro, lo mismo que en las mediciones de calor donde se puede emplear 1 caloría o 1 ergio (con la proporción de $4{,}2 \times 10^{7}$). La unidad de carga eléctrica definida con arreglo a la ley de Coulomb sobre la atracción y repulsión eléctrica (la primera de las dos definiciones citadas) se conoce como unidad electrostática (esu) mientras que la unidad de carga definida según la ley de Oersted sobre la acción de la corriente eléctrica sobre un polo magnético es conocida como unidad electromagnética (emu). Una unidad electromagnética es igual a 3×10^{10} unidades electrostáticas, de suerte que una corriente que transporta 1 unidad electrostática por segundo ejerce una fuerza tan sólo de $1/(3 \times 10^{10})$ dinas sobre una unidad de polo situada a 1 cm, mientras que dos cuerpos cargados con una unidad electromagnética cada uno y situados a una distancia de 1 cm se repelerán con una fuerza de 3×10^{10} dinas. Como al escribir sus ecuaciones, Maxwell tuvo que emplear unidades electrostáticas para los campos eléctricos y unidades electromagnéticas para los campos magnéticos, el factor 3×10^{10} queda implícito en las fórmulas. que tienen un campo eléctrico en un lado de la ecuación y un campo magnético en el otro. Y la aplicación de estas ecuaciones para describir la propagación de las ondas electromagnéticas llevó a la conclusión de que la velocidad de propagación es numéricamente igual a la razón de las dos unidades, es decir 3×10^{10} cm por segundo. Y he aquí que esta cifra coincide exactamente con la velocidad de la luz en el vacío que fue medida por diferentes métodos antes de que Maxwell hubiera nacido. ¡Ah! —probablemente exclamó Maxwell—, esto debe significar que las ondas de luz son efectivamente ondas electromagnéticas de longitud muy corta y este pensamiento condujo al desarrollo de una importante rama de la física: la teoría electromagnética de la luz; Ahora nos explicamos la interacción de luz y materia, incluyendo los fenómenos de emisión, propagación y absorción de de la luz, como el resultado de fuerzas que

actúan entre las ondas cortas electromagnéticas que se propagan y las pequeñas partículas cargadas eléctricamente, los electrones que giran en torno a los núcleos atómicos cargados positivamente. Y así, mediante las ecuaciones de Maxwell, se pueden explicar, hasta el más menudo detalle, todos los fenómenos y leyes de la óptica.

Las coincidencias numéricas entre cantidades físicas aparentemente inconexas, tales como la relación entre las unidades electrostáticas y electromagnéticas por un lado y la velocidad de la luz por otro, han llevado a menudo a nuevos descubrimientos fundamentales y amplias generalizaciones en física. Más adelante en este libro veremos que otra coincidencia semejante entre dos constantes físicas, una relativa a la emisión de la luz y de ondas de calor por los cuerpos calientes y otra a la emisión de electrones por las superficies iluminadas por rayos ultravioletas, resultaron de la mayor importancia para el desarrollo de la teoría de los quanta.

Capítulo 6
La revolución relativista

Como queda dicho en el capítulo anterior, la idea de un medio universal que lo penetra todo y llena el espacio entre y dentro de todos los cuerpos materiales fue establecida firmemente en la ciencia física a fines del siglo XIX. Bajo el nombre de "éter cósmico" de Huygens, este medio servía de vehículo para la propagación de las ondas luminosas; bajo el nombre de tubos de Faraday era responsable de las fuerzas entre los cuerpos cargados de electricidad y magnetizados. Los trabajos de Maxwell llevaron a una síntesis entre estos medios hipotéticos mostrando que la luz era una onda electromagnética que se propaga y suministrando una elegante teoría matemática que enlazaba todos los fenómenos de la luz, la electricidad y el magnetismo. Pero, a pesar de todos estos éxitos, fue imposible para los físicos describir las propiedades de este misterioso medio universal en los términos usados para la descripción de medios materiales conocidos, tales como gases, sólidos y líquidos, y todos los intentos en esta dirección llevaron a violentas contradicciones.

1. La crisis de la física clásica

En efecto, el fenómeno de la polarización de la luz probaba sin duda alguna que se trata de vibraciones transversales en las cuales la materia se mueve perpendicularmente a la dirección de la propagación. Sin embargo, las vibraciones transversales únicamente pueden existir en materias sólidas que, en contraste con líquidos y gases, resisten cualquier tentativa de cambiar su forma, de modo que el éter de la luz ha de ser considerado como una materia sólida. Si es así y si el éter cósmico llena todo el espacio en torno nuestro, ¿cómo podemos andar y correr sobre el suelo y cómo los planetas pueden circular alrededor del Sol miles de millones de años sin encontrar resistencia alguna?

El famoso físico inglés Lord Kelvin intentó resolver esta aparente contradicción atribuyendo al éter cósmico propiedades semejantes a las de la pez de los zapateros o el lacre. Estas sustancias poseen la propiedad conocida como plasticidad y mientras se parten como un trozo de cristal por la acción de una fuerza aplicada rápidamente, estas sustancias fluyen como líquidos bajo fuerzas mucho más débiles

(tales como su propio peso) que actúen durante un largo período de tiempo. Argumentaba que en el caso de las ondas de luz, en que la fuerza cambia de dirección un millón de billones de veces por segundo, el éter cósmico puede comportarse como una materia rígida elástica mientras que en el caso de movimientos mucho más lentos de las personas, los pájaros, los planetas o las estrellas pueden no ofrecer prácticamente resistencia. Pero, si los tubos de Faraday son tensiones y compulsiones en el éter cósmico, los imanes permanentes y las cargas eléctricas estáticas no existirían durante algún período observable de tiempo, puesto que las tensiones serían rápidamente mitigadas por los cambios plásticos en la misteriosa materia. Es muy fácil criticar a quienes llegan a conclusiones erróneas después de haberse conocido la respuesta correcta, pero es realmente sorprendente que los grandes físicos del siglo pasado no se dieran cuenta de que, si existe el éter cósmico, tendría propiedades notablemente diferentes de las de los cuerpos materiales corrientes que nos son familiares, en efecto, es muy conocido que la compresibilidad de los gases, la fluidez los líquidos, la elasticidad de los sólidos y todas las demás propiedades de los cuerpos materiales corrientes son debidas a su estructura molecular y son el resultado del movimiento de las partículas y las fuerzas que actúan entre ellas. Parece que nadie, excepto acaso el químico ruso Dimitri Mendeleiev, que atribuyó al éter cósmico el número atómico cero en su Sistema Periódico de los Elementos, jamás pensó que el éter cósmico tenía una estructura molecular propia y en todo caso tal hipótesis no haría más que llevar a nuevas contradicciones. Si las fuerzas entre los imanes y los cuerpos cagados de electricidad y la propagación de la luz en el espacio deben ser explicadas por la existencia de alguna clase de sustrato, éste no tiene que parecerse en nada a las sustancias materiales que conocemos. Pero la inteligencia humana está frecuentemente demasiado limitada por el pensamiento tradicional, y tuvo que ser el genio de Einstein quien arrojase por la borda el viejo y contradictorio éter cósmico y sustituirlo por la extendida noción de campo electromagnético, al que adscribió una realidad física igual a la de cualquier cuerpo material ordinario.

2. La velocidad de la luz

La primera tentativa de medir la velocidad de la luz fue realizada por Galileo que una noche, acompañado de su ayudante, se trasladó, al campo llevando dos linternas provistas de obturadores. Colocadas a gran distancia, pero de modo que ellos pudieran ver cada una de ellas, realizaron un experimento en el cual el asistente encendía su linterna en cuanto veía el relámpago de la linterna de Galileo. El tiempo transcurrido en la llegada de la señal de retorno indicaría que la luz se propaga con cierta velocidad y permitiría medirla. El resultado de este experimento fue, sin embargo, negativo porque, como se sabe, la luz se propaga con tan enorme velocidad que el retraso esperado no sería más que una centésima de segundo. Más de dos siglos después, el experimento de Galileo fue repetido en forma muy mejorada por el físico francés Armand Hippolyte Fizeau, que empleó el dispositivo de la Figura 25 a.

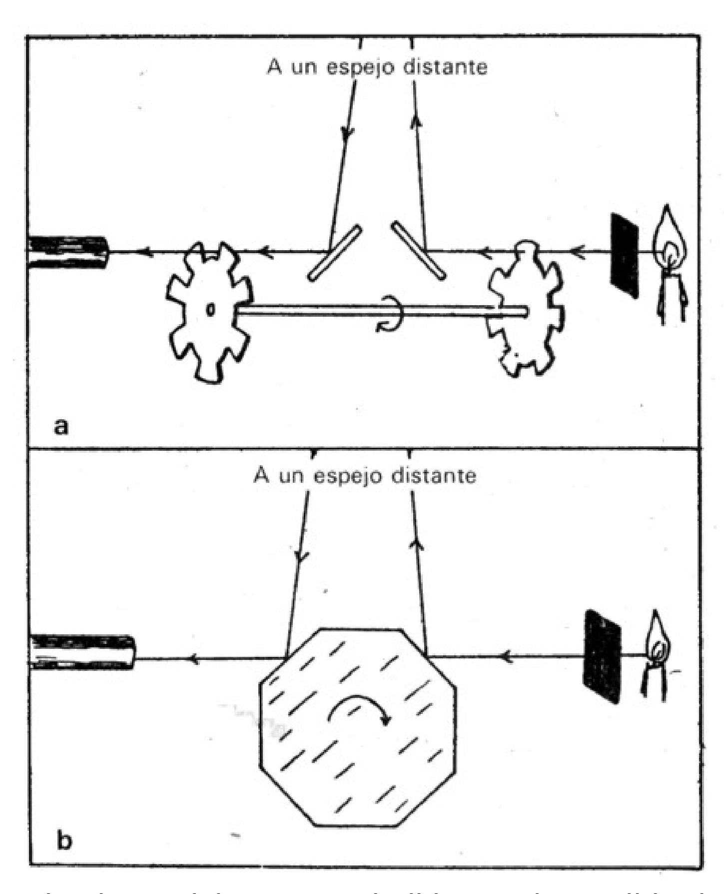


Figura 25. Métodos de Fizeau (a) y Foucault (b) para la medida de la velocidad de la luz.

Consistía en un par de ruedas dentadas situadas en los extremos opuestos de un largo eje. Las ruedas estaban colocadas de tal manera que los dientes de una estuvieran opuestos a los espacios interdentales de la otra de suerte que el rayo de luz procedente de la fuente de la derecha no podía ser visto desde la izquierda, cualquiera que fuese la manera como girase el eje. Sin embargo, cuando las ruedas se movían rápidamente y con tal velocidad que se movían la mitad de la distancia entre los dientes contiguos durante el intervalo de tiempo de propagación de la luz de una rueda a otra, se esperaba que la luz pasara a su través sin ser detenida. La longitud de la trayectoria de la luz entre las dos ruedas fue deliberadamente alargada mediante el empleo de tres espejos, uno de ellos situado a mucha distancia, como se ve en la figura. Haciendo girar las ruedas a la velocidad de unos miles de revoluciones por minuto, vio complacido que, como había esperado, la luz pasaba, sin obstáculo a través del sistema y reuniendo las cifras observadas concluyó que la velocidad de la luz es exactamente 3×10^{10} cm por segundo. Esta cifra coincide con la obtenida solamente tres décadas después de la muerte de Galileo por el astrónomo danés Olaus Römer, mediante sus observaciones sobre el aparente retraso de los eclipses de los satélites de Júpiter cuando el planeta está a diferentes distancias de la Tierra.

El método de Fizeau sólo puede ser empleado para medir la velocidad de la luz en el aire (que es prácticamente lo mismo que en el vacío), puesto que el espejo usado para alargar la trayectoria de la luz ha de estar situado a larga distancia para que el efecto sea observable. Su amigo y colaborador Jean Foucault (ambos, nacidos en 1819, fueron el Cástor y Pólux de la ciencia francesa) logró acortar la distancia sustituyendo las ruedas dentadas por un espejo rotatorio. Su disposición, que aparece en la Figura 25 b y se explica por sí misma, permitió acortar la trayectoria óptica hasta unos cuantos metros, de suerte que pudo hacer que la luz recorriera todo el camino a través de agua o cualquier otra materia transparente. Mediante este experimento observó que la velocidad de la luz en los cuerpos materiales es menor que la velocidad en el vacío, dando de este modo un apoyo tardío, aunque todavía importante, a la concepción de Huygens contra la de Newton. Como la teoría ondulatoria de la luz predecía, la velocidad de la luz en el agua, en el cristal,

etc. resultó ser exactamente su velocidad en el vacío dividida por el índice de refracción de la materia en cuestión.

3. Velocidad de la luz en un medio en movimiento

Ya en posesión de los métodos para la medición precisa de la velocidad de la luz, los físicos del siglo XIX realizaron diversos experimentos sobre las propiedades del éter cósmico, ese medio misterioso a través del cual se suponía que se propagaban las ondas luminosas. Un experimento muy importante, cuya entera significación no se advirtió, sin embargo, hasta la primera publicación de Einstein, fue realizado en 1851 por Fizeau. La idea era ver cómo la velocidad de la luz es influida por el movimiento del medio a través del cual se propaga. En el caso de las ondas sonoras que se propagan por el aire, la velocidad de propagación está, naturalmente, influida directamente por el movimiento de las masas de aire, y la velocidad del sonido a favor o contra el viento aumenta o disminuye en una cantidad igual a la velocidad del viento.

No hay duda sobre esto, pero ¿ocurriría lo mismo en el caso de la luz propagándose a través de un medio en movimiento? Para resolver esta cuestión, Fizeau decidió medir la velocidad de la luz al propagarse a través de un tubo por donde corría agua rápidamente. ¿Se añadiría o restaría la velocidad del agua a la velocidad de la luz en el vacío? El cambio de la velocidad de la luz esperado en tal experimento es, desde luego, muy pequeño, puesto que la velocidad mayor del agua que se puede obtener técnicamente es pequeñísima comparada con la de la luz. Así, las mediciones directas de la velocidad de la luz en este caso, por cualquiera de los métodos de Fizeau o Foucault descritos antes, no mostraron ninguna diferencia. Pero, como en este caso lo que se desea conocer es la diferencia entre las velocidades de la luz a través de agua en movimiento y del agua tranquila se puede emplear un método mucho más preciso fundado en la interferencia de dos rayos de luz. El principio implicado en este experimento se muestra en la Figura 26.

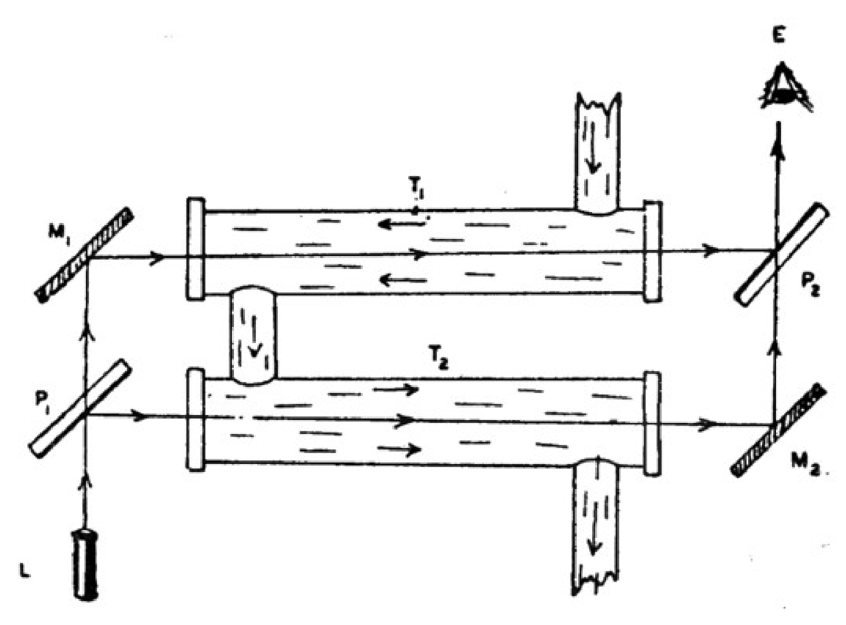


Figura 26. Experimento de Fizeau para observar el cambio de la velocidad de la luz cuando se propaga en un medio en movimiento.

La luz monocromática de una lámpara de mercurio L cae sobre una lámina de cristal P_1 cubierta con una capa muy delgada de plata, la cual es lo bastante gruesa para reflejar la mitad de la luz mientras que la otra mitad pasa a su través y es reflejada por un espejo M_1. De esta manera se obtienen dos haces paralelos de luz de igual intensidad, cuyas vibraciones están sincronizadas como en el caso del experimento de Young descrito en el Capítulo 3. Estos dos haces de luz pasan a través de dos tubos T_1 y T_2 y son reunidos después por medio de la lámina de cristal P_2 y un espejo M_2. Si el agua en ambos tubos está quieta, los dos rayos coinciden en fase a los ojos E del observador (es decir, cresta con cresta, depresión con depresión) y se suman aumentando la intensidad originaria. Si, por el contrario, el agua se mueve en los tubos en direcciones opuestas y "arrastra" ondas luminosas con ella, las ondas del rayo más bajo llegarán a E más pronto que las ondas correspondientes del rayo superior y si la diferencia es exactamente una mitad de la longitud de onda se producirá una interferencia destructora, es decir, cresta con depresión y depresión con cresta. Calculemos ahora aproximadamente a qué velocidad debe moverse el agua en T_1 para producir esta diferencia de fase. La longitud de los tubos en el experimento de Fizeau era de 150 cm y la longitud de onda de la luz empleada era aproximadamente de 0,5 μ (5×10^{-6} cm) de modo que había un tren

de 3 x 10^6 ondas en la longitud del tubo. Para cambiar esta cifra en la mitad de una longitud de onda (de 3 millones a 3 1/2 millones), la velocidad de la luz en el tubo con agua en movimiento debe aumentar o disminuir en una fracción de

$$0{,}5/(3 \times 10^5) = 1{,}7 \times 10^7$$

Como la velocidad de la luz en el agua es aproximadamente 2 x 10^{10} cm por segundo, la velocidad de la corriente de agua necesaria para obtener este resultado debe ser aproximadamente

$$\frac{2 \cdot 10^{10}}{1{,}7 \cdot 10^7} = 10\, m/s$$

que es más bien una velocidad alta, pero viable, de la corriente de agua a través de los tubos. Así, pues, es posible observar los esperados cambios de la velocidad de la luz por virtud de las franjas de interferencia en este experimento.

Mediante mediciones exactas con velocidades variables de la corriente de agua, Fizeau llegó a un resultado intermedio entre las dos posibilidades esperadas. La velocidad de la luz en el agua corriente era diferente que en el agua quieta, pero la diferencia era menor que la velocidad de la corriente del agua. Del desplazamiento observado de las franjas de interferencia dedujo que la velocidad de la luz que se propaga en la dirección de la corriente del agua aumenta en el 44 % de la velocidad del agua mientras que la velocidad de la luz que se propaga en la dirección contraria disminuye en la misma proporción. Cuando se emplearon otros líquidos, el "arrastre" ejercido sobre la luz que se propaga a su través resultó que tenía valores numéricos diferentes y que la velocidad de la luz en un fluido en movimiento puede ser expresada generalmente por una fórmula empírica[19]:

$$V = \frac{c}{\eta} \pm \left(1 - \frac{1}{\eta^2}\right) v$$

[19] Una fórmula empírica es una fórmula que no se deriva matemáticamente sobre la base de una teoría particular sino que se ajusta simplemente a los datos empíricos. Einstein demostró que la misteriosa fórmula empírica es un resultado directo de la teoría de la relatividad.

donde η es el índice de refracción del fluido en cuestión y v la velocidad de la corriente. Ni Fizeau ni ningún otro en aquel tiempo pudo imaginarse lo que significaría, y el caso quedó pendiente hasta que medio siglo después.

4. La velocidad de la luz en la tierra en movimiento

En el año 1887, cuando Einstein tenía ocho años, el físico americano A. A. Michelson y su ayudante E. W. Morley realizaron otro notable experimento. Si Fizeau pudo observar la influencia de una corriente rápida de agua sobre la luz que se propaga a su través, se podría observar también el efecto del movimiento de la Tierra en el espacio sobre la velocidad de la luz medida en su superficie. En efecto, la Tierra se mueve en su órbita alrededor del Sol a la velocidad de 30 km por segundo y, por tanto, debe producirse un viento de éter soplando sobre su superficie y probablemente también a través del cuerpo de la Tierra, exactamente como en el caso de un automovilista que conduce un coche abierto en un día sin viento. El experimento de Michelson y Morley siguió el mismo principio que el de Fizeau, pero tuvo que ser modificado porque en este caso no podía darse el equivalente de dos tubos paralelos a través de los cuales soplase el viento del éter en direcciones, opuestas. En sustitución midieron el tiempo de un viaje redondo de la luz, en un caso propagándose en la dirección del supuesto viento del éter y, en otro caso, propagándose perpendicularmente a él. Para comprender el principio de este experimento, consideremos una canoa automóvil que hace viajes redondos, en un caso siguiendo la longitud de un ancho río y en otro caso corriente arriba. En el primer caso, durante una parte del viaje la lancha será empujada por la corriente y su velocidad será V + v, donde V es la velocidad de la canoa respecto al agua y v es la velocidad del río. Al regreso, la canoa navegará contra corriente y se moverá con la velocidad V—v. Si L es la distancia entre los dos puntos de embarque a lo largo del rio, el tiempo para el viaje de regreso será:

$$t \leftrightharpoons= \frac{L}{V+v} \div \frac{L}{V-v}\frac{2LV}{V^2-v^2} = \frac{2L/V}{1-\frac{v^2}{V^2}}$$

Como V seria 2L/V el tiempo del viaje de regreso en agua quieta, vemos que la existencia de la corriente siempre hará más largo el tiempo. En particular, si v es igual o mayor que V, la canoa nunca regresará y *t*Ξ- seria infinito. Veamos ahora el caso de una canoa navegando a través del río. Si parte del punto A y debe llegar al punto B en línea recta a través del rio, la canoa debe mantener su trayectoria ligeramente río arriba para compensar el empuje de la corriente. Así, mientras recorre la distancia AC respecto al agua, deriva aguas abajo en la distancia CB.

Evidentemente, la relación BC/AC es igual a la relación de las velocidades de la corriente y la canoa. Aplicando el teorema de Pitágoras al triángulo ABC tenemos que

$$\overline{AB^2} + \left(\overline{AC} \cdot \frac{V}{v}\right)^2 = \overline{AC^2}$$

$$\overline{AB^2} = \overline{AC^2} \cdot \left(1 - \frac{V^2}{v^2}\right)$$

$$\overline{AC} = \frac{\overline{AB}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}}$$

Si AB = L tenemos para el tiempo de la travesía y la vuelta:

$$t_{\llcorner} = \frac{2\overline{AC}}{V} = \frac{2L/V}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}}$$

Exactamente como en el caso anterior, el tiempo es mayor que sería en agua quieta, pero el factor de corrección $\sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}$ es menor que el factor $\left(1 - \frac{v^2}{V^2}\right)$ antes obtenido.

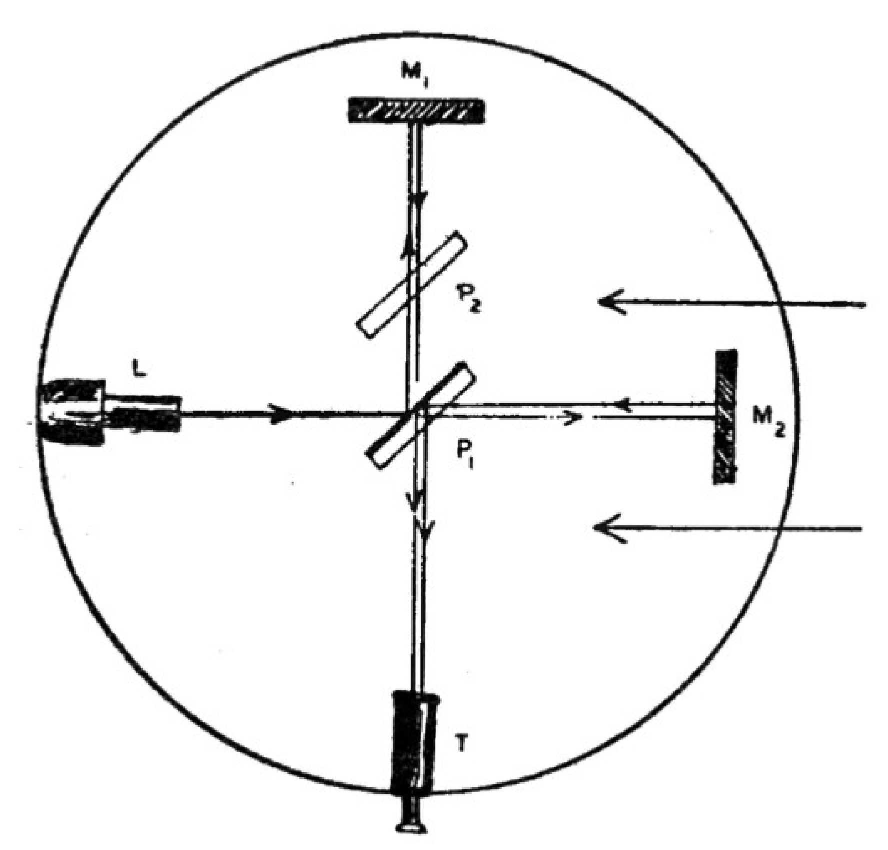


Figura 27. Aparato de Michelson-Morley mostrando las trayectorias de los rayos de luz. Los rayos que inciden y son reflejados por los espejos M_1 y M_2 se representan algo alejados uno de otro por conveniencias del dibujo. La lámina P_2 ha sido introducida para compensar la trayectoria adicional en la lámina P_1 del rayo dirigido a M_2.

Sustituyamos ahora el río por el viento del éter y la canoa por la onda luminosa y tendremos el experimento Michelson-Morley. El dispositivo empleado se muestra esquemáticamente en la Figura 27. Fue montado sobre una losa sólida de mármol flotando en mercurio, de modo que pudiera girar sobre su eje sin mucha dificultad ni sacudidas. Un rayo de luz de la lámpara L caía sobre un cristal en el centro de la losa. La lámina de cristal fue recubierta con una delgada capa de plata que reflejaba únicamente la mitad del rayo incidente y dejaba pasar a su través la otra mitad. Los dos haces se reflejaban después en dos espejos M_1 y M_2, situados a la misma distancia del centro. Volviendo a la lámina plateada de cristal, el rayo reflejado por M_1 llegaba parcialmente a su través (no se cuidaron de lo que ocurría en su otra parte), mientras que el rayo que volvía de M_2 era reflejado parcialmente (nadie

cuidó de lo que ocurría a la otra parte) y estos dos rayos entraban en el telescopio T. Si no hubiera viento de éter los dos rayos coincidirían en fase y producirían el máximo de iluminación en el campo del telescopio. Si, en cambio, soplase el viento del éter, por ejemplo, de derecha a izquierda, el rayo que se propagaba transversalmente al viento quedaría retrasado menos que el que se propagaba contra el viento y habría al menos una parcial interferencia destructiva. Veamos un aproximado cálculo numérico de la situación. La relación de dos períodos de tiempo, t_1 y t_2 para el recorrido de la luz en dos direcciones recíprocamente perpendiculares es, conforme a las anteriores fórmulas:

$$\frac{1-\frac{v^2}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

donde V es sustituido por la velocidad de la luz *c*. La relación $\frac{v^2}{c^2}$ es en este caso igual a

$$\frac{3\cdot 10^2}{3\cdot 10^{10}}=10^{-8}=0{,}00000001$$

Puede demostrarse[20] que para ese pequeño valor de $\frac{v^2}{c^2}$ el radical $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ está bien representado por

$$1-\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}=1 - 0{,}000000005 = 0{,}999999995.$$

Así, la diferencia esperada en la llegada de las dos ondas es tan sólo 5 diezmillonésimas de uno por ciento. Pero es bastante grande para ser perceptible por medio de instrumentos ópticos sensibles. De hecho, si el diámetro de la losa de mármol era 3 metros (y esto es aproximadamente exacto), el tiempo total del recorrido (lamina a espejo y vuelta) era $300/3\cdot 10^{10} = 10^{-8}$ de segundo.

[20] De hecho, este es el acontecimiento de la primera disertación matemática debida a Newton.

Así pues, la diferencia del tiempo de llegada de dos ondas al telescopio era

$$5\cdot10^{-9}\cdot10^{-8} = 5\cdot10^{-17}$$

Para la longitud de onda de $6\cdot10^{-5}$ cm, el período de vibración era $6\cdot10^{-5}$ / $3\cdot10^{-10}$ = $2\cdot10^{-15}$

Así pues, la diferencia del tiempo de llegada era $5\cdot10^{-17}$ / = $2\cdot10^{-15}$ = $2{,}5\cdot10^{-2}$, o el 2,5% del período de vibración y debía producir un grado perceptible de interferencia destructiva. En el experimento, el efecto fue observado, no por una disminución de la intensidad, sino por una desviación de la serie de franjas de interferencia de 2,5 % de la distancia entre ellas. Haciendo girar el aparato 90 grados (para esto flotaba en el mercurio) y cambiando de este modo el papel de los espejos M_1 y M_2 se podía esperar la misma desviación en la dirección opuesta, de modo que la desviación total de las franjas sería el 5% de la distancia entre ellas, y si se observase esta desviación demostraría que la velocidad de la Tierra en el espacio es de 30 km por segundo.

Pues bien, se realizó el experimento y no hubo desviación alguna. ¿Cómo podía ser esto? ¿Era el éter luminoso arrastrado totalmente con el cuerpo de la Tierra en movimiento? La repetición del experimento de Michelson en un globo muy alto sobre el suelo descartó esta posibilidad. Los físicos se rompían la cabeza sin poder explicárselo. Una propuesta sumamente revolucionaria fue formulada por el físico inglés (y realmente irlandés) G. F. Fitzgerald, que sugirió que todos los cuerpos que se mueven con la velocidad v a través del éter cósmico se contraen en la dirección del movimiento por un factor

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

Tal contracción, que había de ser supuesta la misma para todos los cuerpos independientemente de su estructura física, reduciría la distancia entre la lámina plateada central y el espejo a barlovento del viento en el experimento de Michelson-Morley, precisamente en la cantidad adecuada para eliminar toda desviación de las

franjas de interferencia. Se hicieron numerosos intentos para explicar la hipotética "contracción Fitzgerald" mediante fuerzas eléctricas y magnéticas entre los átomos que forman los cuerpos, pero todo fue inútil. Esta atrevida e ingeniosa proposición inspiró una broma que decía:

Era un joven llamado Fiske
cuya esgrima era sorprendentemente rápida;
tan rápida era su acción
que la contracción de Fitzgerald
redujo su estoque a un disco.

Pero esto era únicamente la mitad de la verdad, pero no toda la verdad.

5. Un intermedio

Antes de habérnoslas con la explicación de Einstein del resultado negativo del experimento Michelson-Morley, es entretenido discutir un problema que, aunque sin relación con la teoría de la relatividad tiene, sin embargo, un tufillo relativista. Un hombre en un bote navega corriente arriba (Figura 28) por un río y lleva una botella medio vacía de whisky sobre la popa del bote. Mientras el bote pasa bajo un puente, una ola reflejada por los pilares del puente choca contra la embarcación y la botella cae al agua, sin que el tripulante se dé cuenta. Durante 20 minutos, el bote continúa aguas arriba, mientras la botella flota aguas abajo. Al cabo de los 20 minutos, el hombre ve que la botella ha desaparecido, vuelve el bote (prescindamos del tiempo empleado en la maniobra) y se vuelve aguas abajo con la misma velocidad que antes respecto al agua. Coge la botella una milla más abajo del puente. La pregunta es: ¿cuál es la velocidad del rio? Trátese de resolver el problema antes de leer lo que sigue y se verá qué difícil parece. De hecho, varios buenos matemáticos se vieron completamente confusos por ello.

Pero las cosas se hacen muy sencillas si, en lugar de considerar los hechos descritos en relación con la línea de la orilla, como es natural, se describen con relación al agua del río. Supongamos que estamos en una balsa que flota siguiendo la corriente y miramos alrededor. Respecto a nosotros el agua estará quieta, pero las orillas y el puente se moverán con cierta velocidad.

Pasa un bote y la botella de whisky cae al agua. El bote continúa su curso mientras la botella flota inmóvil en el sitio donde cayó. (Recuérdese que el agua no se mueve en relación con nosotros.).

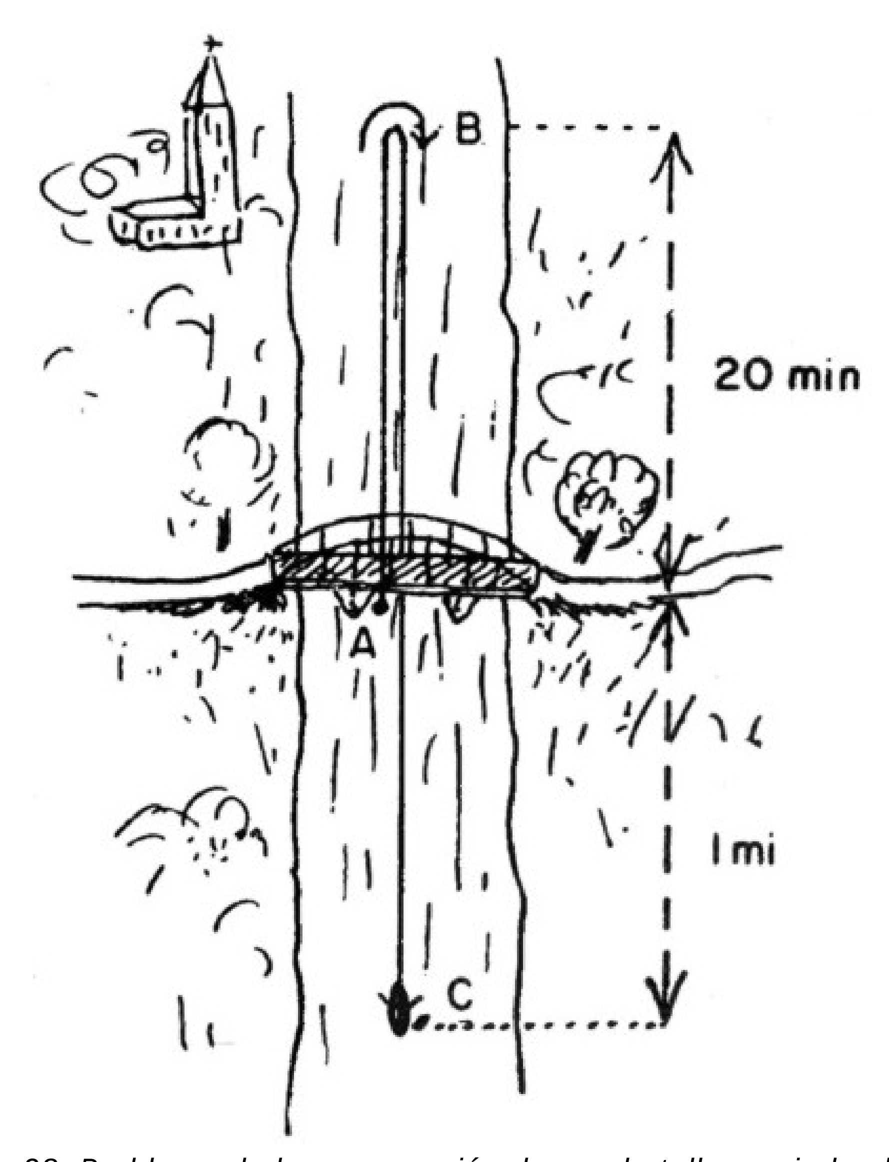


Figura 28. Problema de la recuperación de una botella arrojada al agua.

Veinte minutos después vemos que el bote da la vuelta y se dirige a recobrar la botella. Naturalmente, tarda otros veinte minutos en retroceder hasta ella. Así, pues, la botella ha estado en el agua durante cuarenta minutos, mientras que en este tiempo la línea de la orilla y el puente se ha movido una milla. Por tanto, la velocidad del puente respecto al agua o, lo que es igual, la velocidad del agua

respecto al puente y la línea de la orilla es una milla en cuarenta minutos o 1 1/2 milla por hora. ¿No es sencillo?

6. Fragmento biográfico

Como recuerdo, hemos de decir que Albert Einstein nació el 14 de marzo de 1879 en la pequeña ciudad (famosa por los Maestros Cantores) de Ulm, cerca de Munich, donde su padre tenía un taller de electrotécnica. Pasó su niñez en Munich, después se trasladó a Suiza, donde estudió en la Escuela politécnica de Zurich, y se ganó la vida dando lecciones a estudiantes menos dotados en matemática y física. En 1901 se casó, y obtuvo un puesto tranquilo, pero no muy bien pagado, para el estudio de las patentes en la Oficina de Patentes de Berna. En 1905, a sus veintiséis años, publicó, en la revista alemana *Annales der Physick*, tres artículos que conmovieron al mundo científico. Estos tres artículos se referían a tres amplios campos de la física: calor, electricidad y luz. Uno de ellos, mencionado ya en el Capítulo 4, contenía la teoría detallada del movimiento browniano y fue de capital importancia para el desarrollo de la interpretación mecánica de los fenómenos del calor. Otro explicaba las leyes del efecto fotoeléctrico sobre la base de la entonces reciente hipótesis de los quanta e introducía la idea de paquetes de energía radiante, los fotones. Esta será expuesta en el capítulo siguiente. De los tres artículos, el más importante para el desarrollo de la física llevaba un título más bien insulso: "*Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*", y estaba dedicado a las paradojas de las mediciones de la velocidad de la luz. Ha sido el primer trabajo sobre la teoría de la relatividad.

7. Relatividad del movimiento

El cúmulo de dificultades y contradicciones respecto a la naturaleza del sustrato hipotético, responsable de las interacciones electromagnéticas y la propagación de las ondas luminosas, quedaron enmarañadas en un nudo etéreo inextricable, muy semejante al nudo legendario que ataba el yugo a la lanza del carro del antiguo rey campesino griego Gordio. La predicción de un oráculo de que la persona que deshiciera el nudo gordiano gobernaría toda Asia fue cumplida por Alejandro Magno, que cortó el nudo con un golpe de su espada. De modo análogo, Albert Einstein se

convirtió en el señor de la física moderna al cortar el etéreo nudo con la agudeza de su lógica y arrojar los retorcidos trozos del éter cósmico por las ventanas del templo de la ciencia física.

Pero si no hay éter cósmico llenando todo el espacio del universo, entonces no puede haber movimiento absoluto. Así —dice Einstein— únicamente se puede hablar del movimiento de un cuerpo material respecto a otro o de un sistema de referencia respecto a otro sistema de referencia y dos observadores, situados cada uno en uno de estos sistemas de referencia, tienen el mismo derecho para decir. "*Yo estoy quieto, el otro es el que se mueve.*" Si no hay éter cósmico que suministre un sistema universal de referencia para el movimiento por el espacio, no puede haber métodos para detectar tal movimiento y, de hecho, una afirmación referente a ese movimiento debe ser rechazada como absurda físicamente. No es extraño, por tanto, que Michelson y Morley, al medir en su laboratorio la velocidad de la luz en diferentes direcciones, no pudieran detectar si su laboratorio y la Tierra misma estaban o no moviéndose en el espacio. Recordemos las palabras de Galileo:

> *Enciérrese usted con algún amigo en la estancia más grande bajo la cubierta, de algún gran barco y encierre también allí mosquitos, moscas y otras pequeñas criaturas aladas. Lleve también una gran artesa llena de agua y ponga dentro ciertos peces; cuelgue una cierta botella que gotee su agua en otra botella de cuello estrecho colocada debajo. Entonces, estando el barco quieto, observe cómo estos pequeños animales alados vuelan con parecida velocidad hacia todas las partes de la estancia, cómo los peces nadan indiferentemente hacia todos los lados y cómo todas las gotas caen en la botella situada debajo. Y lanzando cualquier cosa hacia su amigo, usted no necesitará arrojarla con más fuerza en una dirección que en otra, siempre que las distancias sean iguales, y saltando a lo largo, usted llegará tan lejos en una dirección como en otra.*

Después de observar estas particularidades, creo que nadie dudará de que mientras el barco permanezca quieto, deben ocurrir de esta manera; haced que el barco se mueva con la velocidad que usted quiera, siempre que el movimiento sea uniforme y no oscile en esta dirección o en otra, usted no será capaz de distinguir la menor

alteración en todos los efectos citados ni podrá colegir por uno de ellos si el barco se mueve o se está quieto.

Podemos parafrasear las palabras de Galileo para el experimento Michelson-Morley del modo siguiente: *Enciérrese usted con un ayudante en un gran laboratorio sobre la tierra y encierre también fuentes de luz, espejos y toda clase de instrumentos ópticos, y también toda clase de aparatos que puedan medir las fuerzas eléctricas y magnéticas, corrientes y otras cosas. Entonces persuádase usted por un razonamiento lógico de que si la Tierra está quieta la propagación de los rayos luminosos, la interacción de las cargas, imanes y corrientes eléctricas no dependen de sus posiciones relativas y sus direcciones respecto a las paredes del laboratorio. Suponga después que, como es verdad, la Tierra se mueve en torno al Sol y con el Sol en torno al centro del sistema estelar de la Vía Láctea. Usted no será capaz de percibir la menor alteración en todos los efectos anteriores y colegir por ellos si la Tierra se mueve o está quieta.*

Así, lo que era verdad para las moscas, mosquitos, gotas de agua y objetos arrojados sobre el hipotético barco de Galileo que navegaba a través de las aguas azules del Mediterráneo resulta ser verdad también para las ondas luminosas y otros fenómenos electromagnéticos sobre la Tierra moviéndose por el espacio. Galileo podía saber fácilmente si su barco se movía respecto a la Tierra o no, saliendo de su cabina cerrada a la cubierta y mirando el agua o la línea de la costa. De la misma manera, podemos establecer el movimiento de la Tierra en torno al Sol y el del Sol respecto a las estrellas mirando a las estrellas y observando el cambio en sus posiciones aparentes (desplazamiento paraláctico) y las ondas de luz que proceden de ellas (efecto Doppler). Pero sin mirar fuera, es imposible detectar el movimiento en el espacio mediante la observación de los fenómenos electromagnéticos como asimismo es imposible observando los fenómenos mecánicos.

8. La unión de espacio y tiempo

Einstein se dio cuenta de que esta forma ampliada del principio de relatividad de Galileo requería un cambio radical en nuestras ideas fundamentales sobre espacio y tiempo. Desde tiempo inmemorial, el espacio y el tiempo eran considerados como

dos entidades completamente independientes y en sus *Principia* el gran Newton escribió:

> *El espacio absoluto, por su propia naturaleza, sin relación con nada exterior, permanece siempre idéntico e inmóvil.*
>
> *El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí mismo y por su propia naturaleza, corre igualmente sin relación con nada exterior.*

Mientras la definición newtoniana del espacio implica la existencia de un sistema absoluto de referencia para el movimiento a su través, su definición del tiempo implica la existencia de un sistema cronológico absoluto como el que puede ser suministrar un gran número de cronómetros sincronizados o simples relojes, situados en diferentes partes del espacio universal, mostrando todos el tiempo patrón universal. Así como la constancia experimentalmente probada de la velocidad de la luz derrumbó la idea del espacio absoluto, esto hizo lo mismo en el sistema del tiempo universal. Para comprender esta catástrofe del tiempo universal preguntémonos cuál es el mejor procedimiento para sincronizar dos relojes situados a cierta distancia uno de otro. Por supuesto, un empleado de la Compañía del Tiempo Universal podía trasladarse de un punto a otro llevando un cronómetro que señalase el tiempo patrón para poner en hora los relojes locales. Esto es lo que hacían los navegantes de otros tiempos que llevaban cronómetros en sus buques. Pero, ¿quién puede garantizar que un cronómetro no anda mal durante el tránsito? El sistema cronométrico moderno está basado, desde luego, en señales de radio que transmiten la hora con la velocidad de la luz. Para cualquier finalidad práctica de cronometración en la Tierra, el ligero retraso producido por la velocidad finita de la luz puede ser despreciado, pero ciertamente sería importante en el caso de un sistema interplanetario de cronometración en que el retraso sería de varias horas. Sin embargo, esta dificultad puede ser salvada haciendo que la señal haga el viaje de ida y vuelta, reflejándose (sin ningún retraso de tiempo) en la estación receptora de la serial. Así pues, si la señal de tiempo era enviada al tiempo t_1 y devuelta al tiempo t_2, la correcta puesta del reloj en la estación receptora en el momento de su llegada será $(t_1 + t_2)/2$. Como, según el experimento Michelson-Morley, la velocidad de la luz en el vacío es la misma, cualesquiera que sean las condiciones del

movimiento, el método descrito debe ser considerado como absolutamente preciso e inobjetable. La alternativa sería emitir dos señales de luz en direcciones contrarias desde un punto situado exactamente a la mitad entre las dos estaciones y considerar sincronizados los relojes cuando señalen la misma hora al llegar las señales.

El paso siguiente es poner en correlación los relojes en dos sistemas que se mueven uniformemente uno respecto al otro, como, por ejemplo, dos trenes que pasan en direcciones opuestas. Hemos escogido este ejemplo de los trenes a causa de que los empleados ferroviarios están muy orgullosos de sus grandes relojes, a menudo chapeados de oro, que siempre señalan la hora exacta. Para realizar el método de sincronización descrito, un guardafrenos debe balancear su linterna desde un punto en la mitad del tren mientras el maquinista y el conductor, mirando desde la locomotora y el furgón, respectivamente, deben comprobar en sus relojes el momento exacto en que y en la llegada de la luz.

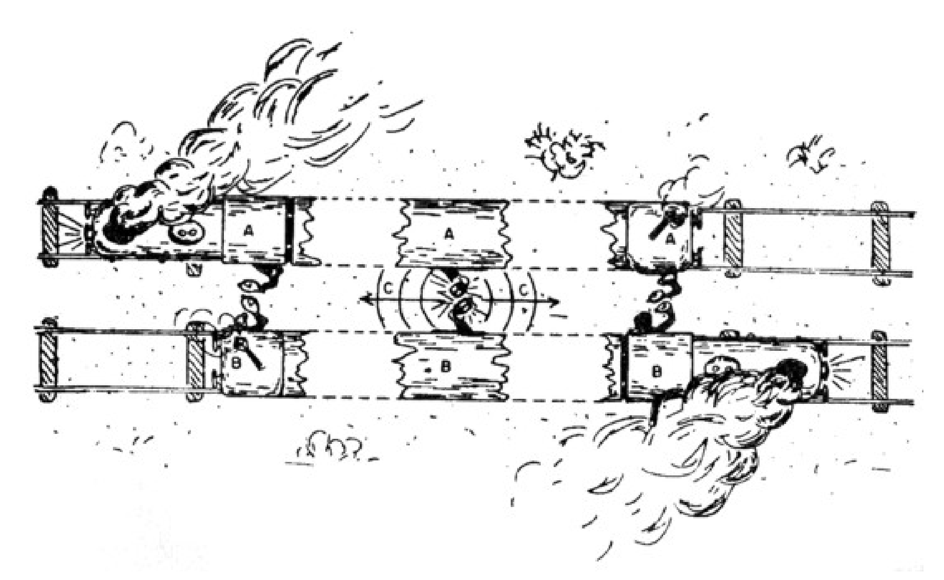


Figura 29. Sincronización de relojes en dos trenes que se mueven uno respecto al otro.

Este procedimiento nos recuerda el antiguo intento de Galileo de medir la velocidad de la luz haciendo centellear una linterna, pero, naturalmente, no queremos decir que tal experimento deba ser realizado realmente por el personal de dos trenes. Es más bien lo que le gustaba a Einstein llamar un "experimento mental" en el cual nos

representamos la situación y tratamos de deducir lo que acontecería sobre la base de los resultados conocidos de los experimentos (tal como el de Michelson-Morley).

Por medio de este método, en los dos trenes A y B se pueden sincronizar los relojes en cada uno de los dos trenes; el problema es comparar el tiempo en un tren con el tiempo en otro. Este puede hacerse en el momento que los dos trenes están en tal posición que la locomotora A pasa justo frente al furgón B y el furgón A pasa frente a la locomotora B (Figura 29).

En efecto, en este momento, el maquinista de A y el conductor de B pueden comparar directamente sus relojes asomándose a la vía y poniéndolos juntos. Lo mismo harían el conductor de A y el maquinista de B.

Podemos relacionar estas comparaciones directas de los relojes con la comparación de las ondas luminosas antes descrita, suponiendo que dos guardafrenos en A y B balancean sus linternas cuando pasan en direcciones exactamente contrarias uno respecto al otro. En este caso, por supuesto, no hay más que una onda luminosa, puesto que ambas linternas coinciden prácticamente.

Veamos ahora el resultado de este procedimiento. Como la luz se propaga con una velocidad finita, empleará algún tiempo en llegar a los dos extremos del tren y cuando por fin llega, la locomotora A estará a la izquierda del furgón B y el furgón A a la derecha de la locomotora B. Así, después de pasar el furgón B, la onda luminosa tardará cierto tiempo en llegar a la locomotora A. Por tanto, si, por virtud del acuerdo respecto al método de las señales de luz para poner los relojes, el maquinista A y el conductor B tienen sus relojes de tal modo que señalan la misma hora cuando el maquinista A y el conductor B ven la luz, el reloj del maquinista A debe estar atrasado respecto al conductor B en el momento de pasar. Por la misma razón, el reloj del conductor A debe estar adelantado respecto al reloj del maquinista B en el momento del encuentro. Ahora bien, como el personal del tren B está seguro de que sus relojes están correctamente sincronizados a causa de que ha empleado el método de las señales de luz, insistirán en que la hora del reloj del tren A está equivocada y que el reloj de la locomotora A está equivocado y que el reloj de la locomotora A atrasa respecto al reloj en el furgón del mismo tren. Análogamente, el personal del tren A considerará que la hora de su reloj es exacta, y dudará de la hora señalada por B. El maquinista de A dirá que el reloj del

conductor B está adelantado respecto a la hora exacta, mientras el conductor de A insistirá en que el reloj del maquinista B está atrasado. Ambos concederán que la hora señalada en el tren B es definitivamente inexacta y que el reloj de la locomotora B atrasa respecto al reloj del furgón B. La cuestión no puede ser zanjada puesto que los trenes A y B no tienen prioridad uno sobre otro, y nosotros debemos concluir que los relojes sincronizados es un sistema aparecerán como no sincronizados cuando se observara desde otro sistema que se mueve respecto a él y viceversa. En otras palabras, dos sucesos que ocurren simultáneamente en un sistema a cierta distancia (la longitud del tren) no resultan simuládselos cuando se les observa desde otro sistema que se mueve respecto al primero. Por consiguiente, el espacio es, al menos parcialmente, intercambiable con el tiempo y una separación puramente espacial de dos sucesos se traduce en una cierta diferencia de tiempo entre ellos cuando se contemplan desde otro sistema en movimiento.

Para ilustrar esta afirmación consideremos un individuo que está cenando en el coche restaurante de un tren en movimiento. Primero come su sopa, después la carne, más tarde el postre. Estos sucesos ocurren todos en el mismo sitio (la misma mesa) respecto al tren, pero en tiempos diferentes. Sin embargo, desde el punto de vista de un observador que está en tierra, el hombre come su sopa y su postre en lugares a muchos kilómetros de distancia. Este hecho trivial se puede formular de la manera siguiente: Sucesos que ocurren en el mismo sitio pero en diferentes tiempos es un sistema, acontecen en diferentes lugares cuando son observados desde otro sistema que se mueve respecto al primero. Sustituyamos en esta frase la palabra sitio por tiempo y viceversa leeremos: Acontecimientos que ocurren al mismo tiempo (es decir, simultáneamente) pero en diferentes sitios de un sistema, ocurren es diferentes tiempos cuando se les observa desde otro sistema que se mueve respecto al primero. Y éste es exactamente el resultado a que habíamos llegado antes.

Si un intervalo cero de tiempo se hace mayor que pero cuando se observa desde un sistema en movimiento, entonces una diferencia física de tiempo entre dos sucesos debe aumentar cuando se observa desde el mismo sistema. Esta es la famosa dilatación del tiempo o retraso del reloj (junto con todos los demás procesos físicos, químicos y biológicos) cuando se observa desde un sistema en movimiento. Como

todos los fenómenos relativistas, la dilatación del tiempo es simétrica respecto a los dos sistemas que se mueven uno respecto a otro, y mientras los relojes en el tren A atrasan observados por el personal del tren B que pasa a su lado, el personal en el tren A insistirá en que los relojes del tren B son los que están atrasados. Puede demostrarse que el esperado retraso del reloj está dado por la fórmula

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

que es análoga a la de la contracción de Fitzgerald, excepto en que el radical está en el denominador.

El retardamiento de todos los procesos físicos en sistemas que se mueven rápidamente fue observado en el caso de la degradación de los "*mesones*", esas inestables partículas elementales que constituyen una fracción esencial de los rayos cósmicos que llegan a la Tierra con una velocidad sumamente elevada. Será expuesto con más detalle en el último capítulo de este libro. El autor espera que cuando este libro vaya a ser impreso, pueda informar sobre los resultados de un experimento sumamente interesante que actualmente está en proyecto. La idea es colocar en un satélite que circule en torno de la Tierra con un reloj atómico, un cronómetro muy preciso en el cual el movimiento de las manillas esté sincronizado con las vibraciones de las moléculas de un gas situado en su interior. Comparando por medio de señales de radio la marcha del reloj en el satélite con un reloj idéntico situado en tierra será posible comprobar la validez del efecto de la dilatación del tiempo en gran escala.

9. Mecánica relativista

El acortamiento de las distancias y la dilatación de los intervalos del tiempo, cuando se observan desde un sistema en movimiento, obliga a una modificación radical en las fórmulas que enlazan las mediciones de tiempo y espacio en un sistema de coordenadas con las mediciones de las mismas magnitudes realizadas en otro sistema que se mueve respecto a aquél. Consideremos dos sistemas de coordenadas (x, y y x', y') que se mueven uno respecto a otro con la velocidad v y

contemos el tiempo en ambos sistemas a partir del momento en que sus orígenes O y O' coinciden. Consideremos ahora un objeto P inmóvil en el primer sistema a la distancia x' de su origen O' ¿Cuál es la coordenada *x* en el otro sistema en el tiempo t, es decir, cuál es la distancia del origen O? La respuesta es muy sencilla si empleamos el punto de vista de Newton. Durante el intervalo de tiempo t, el origen de los dos sistemas de coordenadas se distancia en la longitud vt de modo que

$$x' = x + vt$$

Se puede también añadir la fórmula

$$t' = t$$

que no hace más que reafirmar la definición del tiempo absoluto de Newton.
Antes de Einstein estas dos fórmulas, que se conocen con el nombre de "*transformaciones de Galileo de las coordenadas*", fueron consideradas como una cuestión de sentido común. Pero la posibilidad de la transformación parcial de las distancias espaciales en diferencias de tiempo requiere la sustitución de estas fórmulas aparentemente triviales en otras más complicadas, y se puede demostrar que, para satisfacer la condición de la constancia de la velocidad de la luz y otros efectos relativistas antes expuestos, las transformaciones de Galileo pueden ser sustituidas por un juego de ecuaciones:

$$x' = \frac{x + vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Estas expresiones, conocidas como "*transformaciones de Lorentz*", fueron deducidas por el físico holandés H. A. Lorentz, poco después de haberse publicado los

resultados del experimento Michelson-Morley, pero fueron consideradas por su autor y otros físicos de aquel tiempo más o menos como un curioso juego puramente matemático. Fue Einstein quien primero se dio cuenta de que las transformaciones de Lorentz corresponden efectivamente a la realidad física y obligan a un cambio radical en las viejas ideas de sentido común relativas al espacio, tiempo y movimiento.

Observamos que mientras las transformaciones de Galileo no eran simétricas respecto a las coordenadas de espacio y tiempo las de Lorentz lo son. Para calcular el nuevo tiempo t' ha de añadirse a t un término adicional dependiente de la velocidad relativa v, que es similar al término añadido a la vieja coordenada de espacio x para llegar a la nueva coordenada de espacio x'. En todos los casos que encontramos en la vida diaria, en que todas las velocidades implicadas son mucho menores que la velocidad de la luz (v « c), el segundo término en el numerador de la transformación de tiempo se convierte prácticamente en cero y el factor en el denominador de ambas fórmulas es prácticamente igual a 1. Con esto volvemos a las antiguas transformaciones de Galileo. Pero si las velocidades implicadas son comparables a la de la luz, el término adicional en la transformación de tiempo, queda destruida la noción de simultaneidad absoluta, mientras que la raíz cuadrada de los factores lleva a la contracción de las distancias y la dilatación del tiempo.

Es necesario en este punto discutir un malentendido respecto a la contracción relativista de la longitud. El malentendido perduró entre los físicos durante cincuenta y cuatro años, desde la publicación del primer artículo de Einstein en 1905, hasta que fue corregido en un corto artículo crítico publicado en 1959 por el joven físico americano J. Terrell. Siempre se había creído que la contracción de la longitud por un factor $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ podría ser observada realmente cuando se mirase a un objeto en movimiento si se pudiera conseguir velocidades próximas a la de la luz. Así, una persona que viajara en un avión de la Panamerican vería a un avión de la TWA que pasara muy próximo en dirección contraria (contra los reglamentos de la FAA), contraído de la cabeza a la cola, mientras un pasajero de la TWA observaría que ocurría lo mismo al avión de la Panamerican. Terrell ha demostrado que este concepto era incorrecto y que desde el punto de vista de la observación visual de un

objeto que se mueve rápidamente, no parecería más corto que cuando estuviera quieto. Este resultado es debido al hecho de que, por ser finita la velocidad de la luz, veremos la luz procedente de la proa y de la cola con diferentes retrasos de tiempos, y esta diferencia anulará el efecto de la contracción relativista de la longitud.

Si la luz se propagase con una velocidad infinita, este error en la observación no existiría, pero entonces, claro está, para $c = \infty$, la contracción relativista de la longitud sería, en cualquier caso, igual a cero para cualquier valor de la velocidad relativa de los dos sistemas.

Según el razonamiento de Terrell, mientras la contracción relativista de la longitud no puede ser vista por un observador individual puede, sin embargo, ser fotografiada siempre que el tamaño de las lentes sea mayor que la longitud del objeto en movimiento. Podemos imaginar un avión especial fotográfico equipado con una cámara que se extienda en toda la longitud desde su proa a su cola. La cámara debe tener largas lentes cilíndricas y un "*obturador simultáneo*", es decir, un obturador al extremo de la proa que se cierra simultáneamente con el extremo de su cola (en el sistema de sincronización válido en el avión). Si este avión pasa al lado de un objeto inidentificado que se mueve rápidamente en la dirección contraria, y se toma una foto del objeto, la foto mostrará todas las características de la contracción relativista de la longitud. No es preciso decir que si el objeto fotografiase el avión de la cámara, diría por radio al piloto: "*Usted, también, es más corto*".

No hay lugar en este libro para desarrollar las consecuencias matemáticas de las transformaciones de Lorentz; únicamente indicaremos los resultados más importantes a que conducen. Uno de los principales se refiere a la suma de dos velocidades. Supongamos un portaviones que marcha a través del océano a una velocidad de 35 nudos, es decir, unas 40 millas por hora, y un motociclista que corre a lo largo de su cubierta desde la popa a la proa a una velocidad de 60 millas por hora. ¿Cuál es la velocidad de la motocicleta respecto al agua? En la mecánica clásica la respuesta es sencilla: 40 + 60 = 100 millas por hora. Esta sencilla regla para la adición de velocidades no puede, sin embargo, ser verdad en la mecánica relativista. En efecto, si la velocidad de la cubierta del portaviones y de la

motocicleta son ambas, por ejemplo, el 75% de la velocidad de la luz (lo que es posible, al menos en principio) la velocidad de la motocicleta respecto al agua seria un 50% mayor que la velocidad de la luz. La fórmula relativista para la suma de dos velocidades v_1 y v_2 es

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}}$$

en que V es la velocidad resultante. Puede verse fácilmente que si ambas velocidades son menores que c, V es también menor que c. En efecto, si hacemos $v_1 = c$, tenemos

$$V = \frac{c + v_2}{1 + \frac{cv_2}{c^2}} = \frac{c + v_2}{1 + \frac{v_2}{c}} = \frac{c(c + v_2)}{c + v_2}$$

lo que significa que cualquier velocidad sumada a la velocidad de la luz no aumenta esta última en ninguna cantidad. Si hacemos $v_1 = c$ y $v_2 = c$, tenemos otra vez

$$V = \frac{c + c}{1 + \frac{c \cdot c}{c^2}} = \frac{2c}{1 + 1} = c$$

La fórmula relativista para la suma de velocidades explica el experimento de Fizeau, antes descrito, que se realizó medio siglo antes. Sustituyendo por v_1 el valor de la velocidad de la luz c/n en el agua y escribiendo por v_2 simplemente v para la velocidad del agua en el tubo, tendremos

$$V = \frac{c/n + v}{1 + \frac{cv}{nc^2}} = \frac{c/n + v}{1 + \frac{v}{nc}}$$

Multiplicando numerador y denominador por $1 - \frac{v}{nc}$ tendremos después:

$$V = \frac{(c/n + v)(c/n - v)}{1 - v^2/n^2c^2} = \frac{c/n + v - v/n^2 + v^2/nc^2}{1 - v^2/n^2c^2}$$

Ahora bien, como v es mucho más pequeño que c, (v/c) es un número muy pequeño y $(v/c)^2$ es aún menor. Así, prescindiendo de los términos que contienen $(v/c)^2$ en la fórmula anterior tenemos que:

$$V = \frac{c}{n} + v - \frac{v}{n^2} = \frac{c}{n} + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

que es exactamente la fórmula empírica de Fizeau. Así, pues, no hay nada de aquel "arrastre de éter" por el fluido en movimiento, y la velocidad resultante es simplemente la suma relativista de la velocidad de la luz en el líquido y la velocidad de la corriente del líquido a través del tubo.

Otra consecuencia importante de la mecánica relativista es que la masa de las partículas en movimiento no permanece constante como en el sistema newtoniano, sino que aumenta al aumentar la velocidad. El factor que afecta a la masa de los cuerpos en movimiento es el mismo que afecta al acortamiento de las distancias y la dilatación del tiempo, y la masa de un cuerpo que se mueve con la velocidad v está dada por la expresión

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

en que m_0 es la llamada "masa inerte", es decir, la resistencia inercial a la fuerza que tiende a mover a la partícula inicialmente en reposo. Cuando la velocidad de la partícula aumenta aproximándose a la velocidad de la luz, se hace cada vez más difícil aumentar su velocidad y cuando v = c, la resistencia a una aceleración ulterior se hace infinitamente grande. Esto nos proporciona otro aspecto de la básica afirmación de la teoría de la relatividad de que ningún cuerpo material puede moverse más rápidamente que la luz. En efecto, por virtud de la resistencia inercial aumentada, la energía necesaria para acelerar un cuerpo material y hacerlo mover con la velocidad de la luz seria infinita.

10. La equivalencia masa-energía

Después de rechazar la noción del éter cósmico y volver el espacio interestelar a su anterior estado de vacío, Einstein tenía que hacer algo para mantener la realidad física de las ondas luminosas y los campos electromagnéticos en general. Si no hay éter ¿qué es lo que rodea las cargas eléctricas y los imanes y lo que se propaga a través de un vacío trayéndonos la luz del Sol y las estrellas? Esto sólo puede hacerse considerando el campo electromagnético como alguna clase de medio material, aunque absolutamente diferente de los medios materiales ordinarios que nos son familiares. En física, el adjetivo "material" es equivalente a "ponderable", es decir, que posee alguna masa o peso. Así, pues, las cargas eléctricas y los imanes deben estar rodeados por alguna sustancia ponderable aunque puede ser muy ligera, que es relativamente densa en su vecindad y se reduce a cero a la distancia en que las fuerzas eléctricas y magnéticas desaparecen. Análogamente, los rayos de luz deben ser considerados como corrientes vibrátiles de este material emitidas por los cuerpos luminosos (como los chorros de agua expelidos por las mangas de riego) propagándose a través de un espacio completamente vacío. Mientras que antes se suponía que el éter cósmico estaba distribuido uniformemente a través del espacio, mientras los campos eléctricos y magnéticos sólo se consideraban como una cierta deformación en él, la nueva materia "etérea" se supone que existe únicamente en los lugares donde las fuerzas eléctricas y magnéticas están presentes y no es tanto un transportador de estas fuerzas como estas fuerzas mismas materializadas. Las propiedades físicas de esta materia no pueden describirse por los antiguos términos, tales como rigidez, elasticidad, etc., únicamente aplicables a los cuerpos materiales compuestos de átomos y moléculas, sino por las ecuaciones de Maxwell, que describen las interacciones electromagnéticas en todos sus detalles. Este nuevo punto de vista exige algún tiempo y esfuerzo para ser asimilado, pero liberta a la mente del viejo punto de vista "*materomórfico*" (como en antropomórfico) acerca de la luz.

Pero, ¿cuáles son las razones para atribuir una masa ponderable a esta nueva sustancia "etérea" y cuánta masa se le debe atribuir? La respuesta más fácil a esta cuestión es considerar lo que sucede cuando un haz de luz incide sobre un espejo y

es reflejado por éste. Desde hace mucho se sabía en física que la luz reflejada por un espejo ejerce cierta presión, que aunque no es bastante fuerte para presionar sobre un espejo situado frente a una luz, logra empujar las moléculas de gas de los cuerpos de los cometas cuando se aproximan al Sol. Estas moléculas de gas forman brillantes colas que se extienden por el cielo. La existencia de esta presión de la luz fue demostrada primeramente en el laboratorio por el físico ruso P. N. Lebedev, y se demostró que numéricamente es igual a dos veces la cantidad de energía reflejada dividida por la velocidad de la luz.

Una analogía mecánica de la presión ejercida por un haz de luz reflejado en un espejo es la presión ejercida por un chorro de agua de una manga de hierro sobre un tablero colocado en su camino. Según las leyes de la mecánica clásica, la presión ejercida por un chorro de partículas materiales sobre la pared que las refleja es igual a la "cantidad de movimiento" en la terminología newtoniana (véase el Capítulo 4). Si m es la masa de agua transportada por el chorro en la unidad de tiempo y v es la velocidad del chorro, el cambio de momento es 2mv puesto que cambia de +mv a -mv (en realidad, mv -(-mv)= mv + mv = 2mv).

Si aplicamos un razonamiento idéntico al rayo de luz reflejado por un espejo, tendremos que atribuirle un momento mecánico igual al producto de la "masa de la luz" m que cae sobre el espejo en la unidad de tiempo por su velocidad c. Así, para la presión de la luz escribimos:

$$P_{luz} = 2mc$$

Comparando esta expresión con la relación empírica

$$P_{luz} = 2E/C$$

antes citada, llegamos a la conclusión de que:

$$m = E/c^2 \text{ o } E = mc^2$$

Esta es la famosa "ley de equivalencia masa-energía" de Einstein, que da a la energía radiante "imponderable" de la física clásica una igualdad con la materia ponderable ordinaria. Como c^2 es un número muy grande $9 \cdot 10^{20}$, la masa de cantidades apreciables de energía radiante es muy pequeña si se expresa en las unidades usuales. Así, un destello con una bombilla de 10 vatios emitiendo $6 \cdot 10^9$ ergios de luz por minuto resulta más ligera en $6 \cdot 10^9 / 9 \cdot 10^{20}$ ó $7 \cdot 10^{-12}$ gramos. Por otra parte, el Sol pierde 4 x 10^{11} toneladas por día al esparcir su radiación en el espacio circundante.

La relación entre masa y energía debe ser, por supuesto, generalizada para todos los demás géneros de energía. Los campos que rodean los imanes y los conductores cargados eléctricamente, resultan ser una realidad física ponderable, aunque la masa del campo que rodea a una esfera de cobre de 1 metro de diámetro y cargada con el potencial de 1 kv pesa $2 \cdot 10^{-22}$ gramos mientras el campo de una magneto corriente de laboratorio inclinará el platino por 10^{-15} gramos solamente.

La energía térmica debe poseer también masa ponderable y 1 litro de agua a 100 grados pesa 10^{-20} gramos más que la misma cantidad de agua fría, mientras que la energía total desprendida por una bomba atómica de 20 kilotones pesa aproximadamente un gramo.

Debemos decir algunas palabras relativas a la afirmación que infesta los artículos de los periódicos y de las revistas populares diciendo que la relación masa-energía de Einstein ha servido de base para la invención de la bomba atómica. Es absolutamente inexacto y con el mismo derecho se puede decir que esa relación sirve de base para el descubrimiento de la nitroglicerina por Nobel o la invención de la máquina de vapor por Watt. En todos los casos, cuando se realiza una transformación física o química, con liberación de cierta cantidad de energía, la masa de los productos es menor que la masa de los ingredientes primitivos por la masa de la energía liberada. Así, los gases que resultan de la explosión de la nitroglicerina pesan menos que la cantidad originaria de explosivo; el vapor desprendido por una máquina de vapor pesa menos que el agua caliente de la caldera; y el peso de los gases liberados y las cenizas en la combustión de la madera pesa menos que el primitivo leño. Pero, en todos estos casos, el peso de la energía liberada es tan pequeño con relación al peso del material primitivo que no

puede ser medido aunque se empleen las balanzas más precisas. Ningún físico puede darse cuenta de la diferencia de peso entre un vaso de agua fría y otro de agua caliente y ningún químico ha detectado todavía la diferencia entre el peso del agua y el peso de los gases de hidrógeno y oxigeno que la constituyen.

En el caso de las reacciones nucleares, las cantidades de energía producida son mucho mayores, y aunque sería imposible recoger todos los productos de la fisión de una bomba y probar que pesan exactamente un gramo menos que la masa original de plutonio, se puede determinar, mediante delicados métodos de experimentación nuclear los valores exactos de la masa de los átomos individuales y la diferencia entre las masas combinadas que entran en la reacción nuclear y la producen. Pero todo ello es justamente la diferencia en precisión. Así, el papel de Einstein en el desarrollo de la bomba atómica no fue la formulación de la ley de $E = mc^2$, sino una carta al presidente Roosevelt la cual, con el peso de la autoridad de Einstein, puso en marcha el proyecto Manhattan.

Un cuerpo material que se mueve con cierta velocidad lleva consigo la energía cinética de movimiento, y la masa adicional de esta energía explica el aumento relativista de masa. La ley de equivalencia de Einstein se aplica también a la transformación de las partículas elementales. Para crear un par de un electrón y un antielectrón (o de un protón y un antiprotón) ha de ser suministrada una cantidad de energía equivalente a su masa combinada, y la misma cantidad de energía se libera como radiación de alta frecuencia cuando las dos partículas se aniquilan mutuamente.

11. El mundo de cuatro dimensiones

La contracción relativista del espacio es equivalente matemáticamente a la contracción de los objetos en movimiento de Fitzgerald, pero, mientras que Fitzgerald pensaba que esta contracción era un efecto físico real producido por el movimiento de los cuerpos materiales a través del éter, la teoría de la relatividad considera que es acortamiento aparente de las distancias cuando son vistas desde un sistema en movimiento. Ambas, la contracción del espacio y la dilatación del tiempo, son simétricas respecto a ambos sistemas en un estado de movimiento relativo. Siempre que las distancias se achican, los intervalos de tiempo se alargan,

lo que es análogo al caso de las proyecciones vertical y horizontal de un bastón con la longitud L. Si el bastón se coloca verticalmente su proyección vertical es cero y su proyección horizontal es L. Si se coloca horizontalmente su proyección vertical es L y la horizontal cero. Si se coloca en un cierto ángulo las dos proyecciones son diferentes de cero.

Pero cualquiera que sea el ángulo, tenemos por el teorema de Pitágoras que:

$$\Delta x^2 + \Delta y^2 = L^2$$

La analogía llevó al matemático alemán H. Minkowski (cuyos trabajos aparecieron poco después de las primeras publicaciones de Einstein) a la conclusión de que el tiempo puede ser considerado, en cierto modo, como la cuarta coordenada complementaria de las tres coordenadas del espacio y que el movimiento de un sistema respecto a otro puede ser tratado como una rotación del entrecruzamiento de esta cuarta coordenada dimensional.

En la vida diaria especificamos diferentes sucesos señalando la hora y el lugar; decimos que la reunión será en el piso quince en la esquina de la Sexta Avenida y la calle 32 a las ocho de la tarde. Y es usual hacer diagramas en que las posiciones están señaladas respecto al tiempo. Pero estos diagramas, que no son muy diferentes de los diagramas que señalan el cambio de las cotizaciones de la Bolsa de mes en mes no son más que una representación gráfica de la dependencia entre dos cantidades interrelacionadas y no pueden ser consideradas en ningún sentido como sujetas a operaciones y normas geométricas estándares. Si el tiempo ha de ser considerado como una autentica cuarta coordenada, debe ante todo ser medido en las mismas unidades que las tres coordenadas del espacio. Esto puede hacerse multiplicando el tiempo, dado primeramente en segundos, por alguna velocidad tipo que lleve la distancia expresada en centímetros, es decir, lo mismo que las tres coordenadas espaciales. Sería absurdo escoger para esta finalidad alguna unidad arbitraria, tal como la velocidad límite en las carreteras (que depende de la legislación local) o incluso la velocidad del sonido (que depende de la materia y la temperatura). Desde luego, lo mejor será escoger la velocidad de la luz en el vacío, que está evidentemente relacionada con las leyes básicas de la Naturaleza y que,

como ha demostrado el experimento Michelson-Morley, es invariable. Así, empleando (x, y, z) para las tres primeras coordenadas (del espacio) emplearemos ct para la cuarta coordenada de tiempo. Pero esto no es lo único que ha de hacerse. En el caso de las coordenadas espaciales (x, y, z) las tres son intercambiables a voluntad y la longitud de una caja de madera se convierte en su altura si la ponemos sobre uno de sus lados. Es evidente que tal completo intercambio no puede existir en el caso de coordenadas de tiempo y espacio. De otro modo se podría convertir un reloj en una vara de una yarda y viceversa. Así, si el tiempo ha de ser considerado como la cuarta coordenada, no solamente debe ser multiplicado por c, sino también por algún otro factor que, sin destrozar la armonía del sistema tetradimensional de las coordenadas haga a la coordenada de tiempo físicamente diferente de las tres coordenadas espaciales. La matemática nos suministra precisamente este factor conocido como una "unidad imaginaria" que se designa con el símbolo i.

Una "unidad imaginaria" se define como la raíz cuadrada de menos uno:

$$i = \sqrt{-1}$$

Y como conforme al álgebra elemental $(+ 1)^2 = + 1$ y también $(-1)^2 = = + 1$, el número i no está entre los números corrientes positivos o negativos y por eso se le llama "unidad imaginaria". No se emplea en la contabilidad ordinaria y mientras "*tener 1,00 dólar*" significa que se tiene un dólar en su cuenta corriente, i dólares no significa nada en las operaciones de banca.

Pero los matemáticos y los físicos teóricos consideran muy conveniente el uso de i en sus cálculos, siempre que caiga en los resultados finales que deben tener una interpretación física. Y esto siempre ocurre cuando los resultados finales contienen solamente los cuadrados de i, puesto que $i^2 = -1$ y es un número ordinario negativo. Así, usamos la "unidad imaginaria" como el cofactor adicional y escribiremos la cuarta coordenada como ict. Como es imposible trazar cuatro perpendiculares unas a otras, prescindiremos de la tercera coordenada espacial z y en su lugar empleamos la nueva coordenada de tiempo ict. El resultado es el diagrama de la Figura 30 donde los ejes de las coordenadas del espacio x e y están en un plano

horizontal (respecto al lector) y el eje imaginario del tiempo corre verticalmente. Cada punto en este diagrama representa un suceso, es decir, algo que acontece en un lugar definido en un tiempo definido. Los sucesos simultáneos (en el sistema particular de referencia para el cual está trazado el diagrama) están representados por puntos en planos perpendiculares al eje del tiempo. Los que ocurren en tiempos diferentes, pero en el mismo lugar (repetimos, en este particular sistema de referencia) están en líneas rectas paralelas al eje del tiempo. La superficie cónica con una abertura de 90 grados, conocida como "luz del cono", corresponde a los sucesos que pueden ser enlazados por una señal luminosa. Si, por ejemplo, el punto (o suceso) A representa un destello que emite una onda luminosa, el punto B corresponde a la iluminación por esa luz de un objeto situado donde quiera en el espacio.

Como queda dicho, las observaciones de intervalos de espacio y tiempo de un sistema en movimiento pueden ser interpretadas geométricamente como la rotación de un entrecruzamiento de las coordenadas tetradimensionales en el cual el eje del tiempo se inclina en un cierto ángulo (líneas de guiones y letras en la Figura 30). Como, no obstante, la velocidad del movimiento nunca puede ser mayor que la velocidad de la luz c, el ángulo en que se inclina el eje ict nunca puede ser mayor de 90 grados. Así, pues, podemos distinguir dos clases diferentes de pares de sucesos.

1. Sucesos, como E y F, para los cuales el ángulo entre la línea EF que los enlaza con el eje del tiempo forma un ángulo menor que 90 grados. En este caso podemos encontrar un sistema de coordenadas que se mueva respecto al primitivo con tal velocidad que ambos sucesos estén en el nuevo eje del tiempo ict' y su distancia espacial se reduzca a cero.

Esta clase de rotación de los ejes espacio-tiempo es trivial y lo encontramos en la vida diaria. Si, por ejemplo, queremos ver un partido de fútbol el lunes en una ciudad y el martes en otra ciudad, situada a un par de millas de distancia, nos trasladaremos después de terminar el primer partido para estar en la otra ciudad antes de que comience el segundo. Aunque las posiciones de los estadios son diferentes respecto al ecuador y al meridiano de Greenwich, ambos estadios estarán prácticamente en el mismo lugar respecto al sistema de coordenadas enlazado con el automóvil.

La separación espacio-tiempo de los dos sucesos deportivos que acabamos de describir es llamada separación *timelike* a causa de que moviéndonos con la velocidad adecuada podemos reducir a cero su separación espacial y observarlos desde el mismo lugar (el asiento del coche) en diferentes tiempos (un día de diferencia).

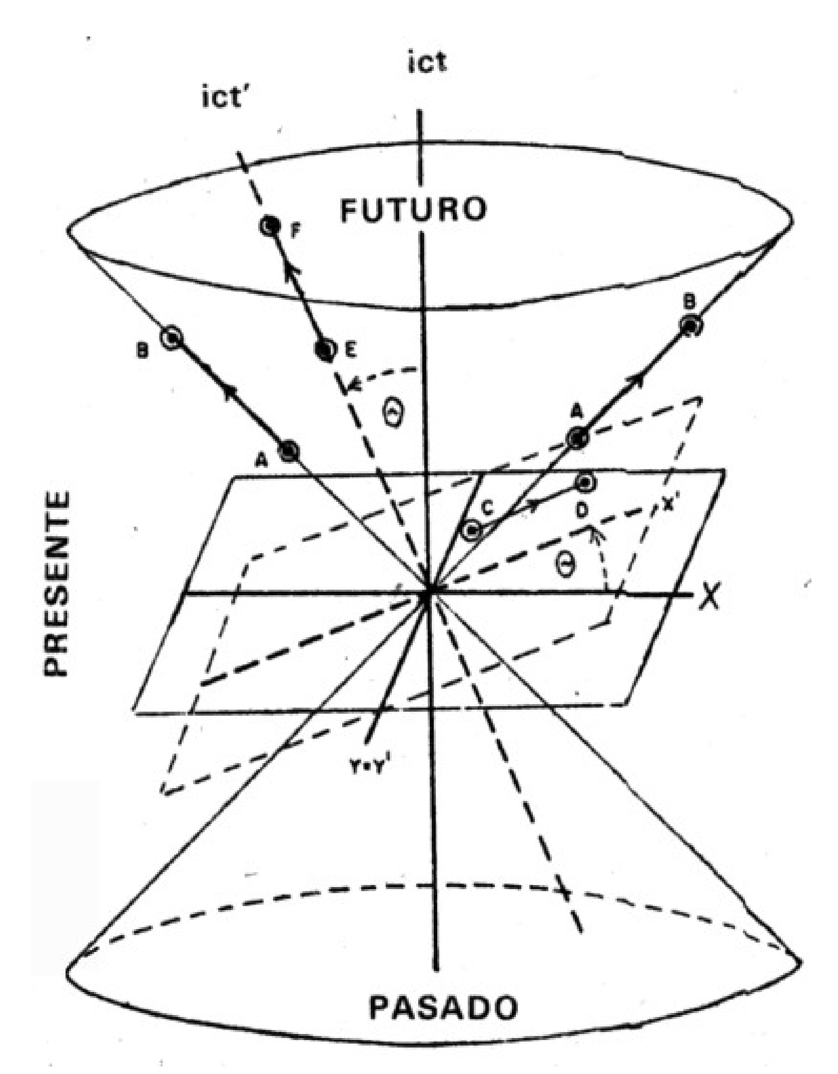


Figura 30. El continuo espacio-tiempo conteniendo dos coordenadas de espacio (x e y) y la coordenada de tiempo (ict). Las superficies cónicas que representan la propagación de la luz ($x^2 \cdot y^2 - c^2t^2 = 0$) dividen el continuo en "presente", "pasado" y ''futuro".

2. Sucesos, como C y D, para los cuales el ángulo entre la línea CD y el eje del tiempo es mayor que 90 grados. En este caso no podemos ir del primer partido al segundo a menos que nos movamos más velozmente que la luz. Así, por ejemplo,

como la luz tarda 5 horas y 20 minutos en recorrer la distancia desde Mercurio a Plutón, no podemos asistir a una comida a la una en Mercurio y a un cóctel a las cinco dado el mismo día en Plutón. Por otra parte, podemos siempre escoger una adecuada velocidad para reducir a cero la diferencia de tiempo entre los dos sucesos y hacerlos simultáneos en el sistema de coordenadas espacio-tiempo escogido. La separación espaciotemporal de tales parejas de sucesos se llama *spacelike* puesto que, moviéndose con una velocidad adecuada, podemos reducir a cero la diferencia de tiempo.

Ahora podemos dar una nueva definición de las viejas nociones de "pasado, presente y futuro". Si nos consideramos situados en el origen de las coordenadas mostradas en la Figura 30 y decimos: "Yo estoy aquí (x=0, y = 0, z = 0) y también (t = 0)" todos los sucesos situados en la parte superior del cono (t positivo) serán el futuro, puesto que, no importa cómo nos movamos, pasará algún tiempo antes de que los veamos. Podemos influir sobre los sucesos futuros haciendo algo respecto a ellos, pero no podemos ser influidos por ellos. Análogamente, todos los sucesos situados en la parte inferior del cono (t negativo) serán el pasado, puesto que, no importa la rapidez con que nos movamos, no los podemos ver. Por ejemplo, es imposible volar en el espacio tan rápidamente que podamos coger las ondas luminosas de la explosión de la primera bomba atómica o del incendio de Roma. Estos sucesos pasados pueden influir sobre nosotros, pero no podemos influir sobre ellos. Entre las partes superior e inferior del cono está "la tierra de nadie" a la que generalmente llamamos "presente". Este incluye los sucesos que son simultáneos desde nuestro punto de vista o pueden convertirse en simultáneos si los observamos desde un sistema de referencia que se mueve con menos velocidad que la luz. El hecho de que el "presente" ocupe en la Figura 30 tanto espacio, es debido, por supuesto, a nuestra decisión de usar ct en lugar de únicamente t para contar los intervalos de tiempo. Si usamos t en lugar de ct, la escala vertical se acortaría por un factor de $3 \cdot 10^{10}$, las partes superior e inferior de la abertura del cono se ensancharían y el espacio entre ellas se achicaría prácticamente a cero. Esto es lo que observamos en la vida diaria con las velocidades, despreciables por pequeñas, comparadas con las de la luz.

Ahora bien, volviendo al espacio tridimensional e introduciendo la coordenada z podemos realizar algunos juegos matemáticos que implican la "unidad imaginaria" en la expresión para la cuarta coordenada. Supongamos que enviamos una señal luminosa desde el origen de las coordenadas x= 0, y = 0, z = 0 en el momento t = 0. En el tiempo t, la señal luminosa llega a alguna posición con las coordenadas x, y y z, su distancia desde el origen será, según el teorema de Pitágoras:

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Como la luz siempre se propaga con la velocidad c, esa distancia debe ser igual a ct y podemos escribir:

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = ct$$

o bien

$$x^2 + y^2 + z^2 = (ct)^2$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2 = 0$$

Pero como -1 = i^2, podemos escribir la expresión anterior de este modo:

$$x^2 + y^2 + z^2 + (ict)^2 = 0$$

cuyo término de la izquierda es la suma pitagórica de los cuadrados para el espacio tetradimensional. En el sistema de coordenadas que se mueve respecto al primero, tendremos:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 + (ict')^2 = 0$$

de suerte que la suma de los cuatro cuadrados no cambia por la rotación del sistema tetradimensional de coordenadas. Se puede demostrar empleando las transformaciones de Lorentz, que lo mismo es verdad para la separación de espacio

y tiempo de cualesquiera dos puntos (x, y, z, ict) espacio que representen dos sucesos. Así, pues, la expresión

$$x^2 + y^2 + z^2 + (ict)^2$$

es invariante (es decir inmodificable), cualquiera que sea el sistema de referencia en que los dos sucesos son observados. Sus separaciones en el espacio tridimensional y tiempo unidimensional cambiarán, pero su separación tetradimensional, dada por la expresión anterior, siempre sigue siendo la misma. Así, empleando ict como cuarta coordenada, conseguimos la unión matemática de espacio y tiempo y podemos considerar todo suceso físico como ocurriendo en el mundo espaciotemporal de cuatro dimensiones. No olvidemos, sin embargo, que esto únicamente puede ser conseguido por el empleo de una "unidad imaginaria", que es una pérfida sirviente y que cuando las cartas se ponen boca arriba y se requieren los valores reales, el espacio y el tiempo no son exactamente la misma cosa.

12. Teoría relativista de la gravitación

Como queda dicho anteriormente, la teoría de la relatividad de Einstein puede ser considerada como una brillante culminación de los argumentos de Galileo respecto a los experimentos mecánicos realizados en la cabina interior de un barco que se mueve uniformemente. La generalización de esta teoría al caso del movimiento no uniforme, la cual se suele llamar "teoría general de la relatividad", pero se la describe mejor como "teoría relativista de la gravitación", tiene también sus raíces en el experimento de Galileo en el que un cuerpo ligero y otro pesado fueron arrojados desde lo alto de la torre inclinada de Pisa. El hecho empírico de que los cuerpos ligero y pesado cayeran exactamente con la misma aceleración ha sido un completo misterio a través de los tiempos hasta que en 1914 se publicó un artículo de Einstein sobre la relación entre el movimiento acelerado y la fuerza de la gravedad.

En este artículo, Einstein describe experimentos imaginarios que pueden realizarse dentro de una cámara cerrada que flota libremente en el espacio interestelar. Por

virtud de la ausencia de gravedad, todos los objetos que están en la cámara no tienen tendencia a moverse en ninguna dirección. Pero si se acelera la cámara, por ejemplo, mediante un par de motores de reacción adheridos a su fondo, la situación dentro es completamente diferente; todos los objetos se apretarán contra el suelo como si hubiera una fuerza de gravedad gravitatoria que los impulsa hacia abajo. Consideremos un hombre de pie sobre el suelo de este laboratorio espacial que se mueve con una aceleración uniforme a, teniendo en sus manos dos esferas, una ligera y otra pesada. A causa de la aceleración de todo el sistema, los pies del hombre se apretarán firmemente contra el suelo y las dos esferas presionarán sobre las palmas de las manos. ¿Qué ocurrirá ahora si las suelta al mismo tiempo? Al estar desconectadas del cuerpo del cohete, las dos esferas continuarán moviéndose con la velocidad que tenían en el momento de soltarlas y por tanto quedarán una al lado de otra. Por otra parte, como el movimiento del cohete es acelerado, continuará ganando continuamente velocidad y el suelo de la cámara pronto alcanzará a las dos esferas y chocará con ellas al mismo tiempo. Después del choque, las dos esferas permanecerán apretadas contra el suelo, siendo aceleradas juntamente con el resto del sistema. Pero el observador dentro de la cámara observará que las dos esferas que ha soltado comenzaron a caer con aceleraciones iguales y así chocaron contra el suelo al mismo tiempo. Esta es la equivalencia entre gravedad y aceleración, que es asunto de conocimiento común en la "edad espacial" en que vivimos.

Pero esta analogía de los fenómenos mecánicos que ocurren dentro de un cohete acelerado y en el campo de gravedad originado por la gran masa de la Tierra es pura coincidencia o tiene una profunda relación con la naturaleza de las fuerzas gravitatorias? Einstein estaba seguro de que lo último era el caso y se preguntó cómo se comportaría un rayo de luz dentro de una cámara acelerada. Imaginemos un reflector adherido a la pared de la cámara enviando un haz luminoso a su través. Para observar el paso del rayo se pueden colocar en su camino una serie de placas de cristal fluorescente situadas a distancias iguales. Si la cámara no está acelerada, los puntos en los cuales el rayo atraviesa las placas de cristal estarán, naturalmente, en línea recta y será imposible decir si el cohete está quieto o en un estado de movimiento uniforme, digamos, por ejemplo, respecto a las estrellas

fijas. Sin embargo, la situación es diferente si la cámara se mueve con una aceleración uniforme a. El tiempo necesario para que la luz atraviese la primera, la segunda, la tercera, etc. placas de cristal aumenta en progresión aritmética 1, 2, 3, etcétera, mientras que los desplazamientos del cohete, moviéndose con una aceleración constante, aumentara en progresión geométrica 1, 4, 9, etc. Así, pues, las manchas del rayo de luz en las placas de cristal fluorescente formarán una parábola idéntica a la trayectoria de una piedra arrojada horizontalmente. Por tanto, si la equivalencia de aceleración y gravedad se extiende a los fenómenos electromagnéticos, los rayos de luz deben curvarse por virtud del campo gravitatorio. Sin embargo, a causa de la gran velocidad de la luz, su curvatura en el campo gravitatorio de la Tierra es demasiado pequeña para que se pueda observar. En efecto, si un rayo horizontal de luz recorre, por ejemplo, 30 metros antes de incidir en la pantalla, cubre la distancia en $3 \cdot 10^3/3 \cdot 10^{10} = 10^{-7}$ segundos. Como la aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra es aproximadamente de 10^3 cm/seg^2, el desplazamiento vertical del rayo de luz en la pantalla será de

$$½ \cdot 10^3 \cdot (10^{-7})^2 = 5 \cdot 10^{-12}$$

¡comparable con el diámetro del núcleo atómico!

Einstein pensó, sin embargo, que podía esperarse una desviación observable de los rayos de luz cuando pasan cerca de la superficie del Sol. He aquí un cálculo aproximado de la desviación esperada. La aceleración de la gravedad cerca de la superficie del Sol es el producto de la constante gravitatoria ($6{,}7 \cdot 10^{-8}$) y la masa del Sol ($2 \cdot 10^{33}$) dividida por el cuadrado del radio del Sol ($7 \cdot 10^{10}$) será

$$\frac{6{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 10^{33}}{(7 \cdot 10^{10})^2} = 3 \cdot 10^4 \ \frac{cm}{seg^2}$$

La distancia recorrida en el campo gravitatorio del Sol es comparable al diámetro solar ($1{,}4 \cdot 10^{11}$) y el tiempo que se tarda en cubrirla es $1{,}4 \cdot 10^{11}/3 \cdot 10^{10} = 5$ seg. Durante este tiempo el rayo de luz caerá:

$$\frac{1}{2}\cdot 3\cdot 10^4\cdot 25 = 3{,}7\cdot 10^5 \text{ cm}$$

y el ángulo de desviación será:

$$3{,}7\cdot 10^5/7\cdot 10^{10} = 6\cdot 10^{-6} \text{ radianes}$$

o sea aproximadamente 1 segundo angular.

Otros cálculos más exactos para la desviación del rayo de luz que pasa rozando el disco solar dan el valor de 1,75 seg angular. A causa de que las estrellas cercanas al Sol únicamente pueden ser vistas durante un eclipse total de Sol, una expedición astronómica inglesa se trasladó a África en 1919 donde se vería uno de esos eclipses. (Los astrónomos alemanes no fueron a causa del bloqueo de la guerra). Los resultados se ajustaron plenamente a las predicciones de Einstein. Cuando se los comunicaron a Einstein se sonrió sencillamente y dijo que hubiera quedado muy sorprendido si los resultados fueran negativos. Estas y otras confirmaciones de la teoría demostraron, sin duda alguna, la correlación entre los fenómenos que ocurren en los campos gravitatorios y en los sistemas acelerados.

13. La gravitación y la curvatura del espacio

Todo el mundo sabe lo que se entiende por una línea curva o una superficie curva, Pero requiere cierta imaginación comprender la significación del espacio curvado en tres dimensiones. La dificultad de formarse una idea del espacio curvo es que mientras podemos contemplar una superficie desde fuera de ella y ver si es plana o curva, nosotros vivimos dentro del espacio y no podemos salir de él para mirarlo. La mejor manera de exponer las propiedades del espacio curvo es empleando una analogía de criaturas imaginarias de dos dimensiones que viven en la superficie y no tienen idea de que hay una dirección perpendicular a esta superficie. ¿Cómo pueden decir si la superficie en que viven es un plano o una esfera u otra cosa sin salir de ella? La respuesta es, por supuesto, que deben estudiar geometria sobre su superficie trazando diversas figuras, midiendo ángulos, etc.: en la Figura 31 damos un ejemplo de estos geómetras bidimensionales estudiando un triángulo trazado sobre un plano, sobre una esfera y sobre la llamada "superficie de silla de montar".

Si en una superficie plana (a), se aplican las reglas de la geometria plana euclidiana, y la suma de los tres ángulos de un triángulo siempre se encontrará que es igual a 180 grados. Sobre una superficie esférica (b), la suma de los tres ángulos siempre será mayor que 180 grados, como se puede ver fácilmente trazando sobre un globo terráqueo un triángulo formado por dos medios meridianos y una sección del ecuador comprendido entre ellos.

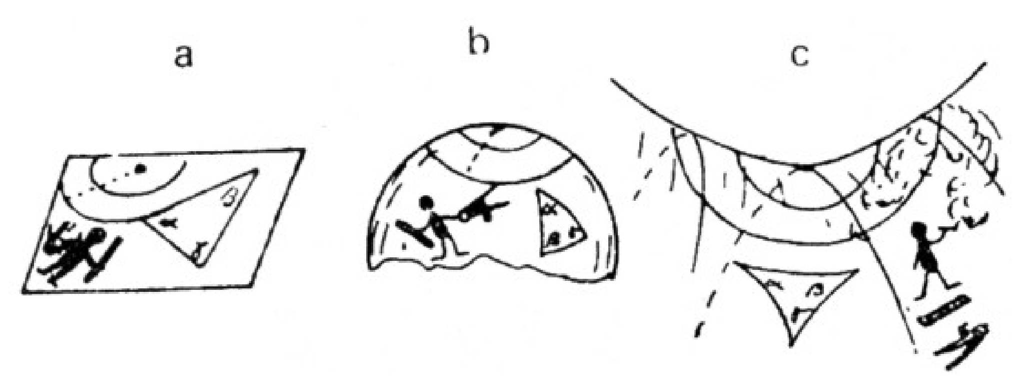


Figura 31. Tres diferentes tipos de superficies (dos dimensiones) curvas. a) Superficie plana: curvatura cero. b) Superficie esférica: curvatura positiva. c) Superficie de silla de montar: curvatura negativa. La diferencia entre los tres casos puede ser descubierta por seres inteligentes bidimensionales si estudian la geometria de los círculos o triángulos.

Como los meridianos cortan al ecuador en ángulo recto, los dos ángulos en la base de nuestro triángulo esférico ya suman los 180 grados. A estos tenemos que añadir el ángulo en el polo que también puede ser muy grande. En pequeños triángulos esféricos la suma de los tres ángulos se aproximará a los 180 grados, pero la diferencia desaparece tan sólo cuando el triángulo es infinitamente más pequeño que la esfera sobre la cual se trata. En una superficie de silla de montar (c), la situación es diferente y la suma de los tres ángulos es menor que 180 grados. Se acostumbra atribuir a una superficie esférica una curvatura positiva y a una superficie de silla de montar una curvatura negativa.

Podemos extender estas conclusiones al caso del espacio de tres dimensiones y decir que el espacio es plano o posee una curvatura positiva o negativa, dependiendo de si la suma de los ángulos de los triángulos tratados entre cualesquiera tres puntos en este espacio es igual, mayor o, menor que 180 grados. Consideremos un experimento de triangulación en gran escala en el cual tres

astrónomos, equipados con teodolitos (Figura 32) se sitúan en la Tierra, en Venus y en Marte, y miden los tres ángulos del triángulo TVM. Como, según hemos visto en el capítulo anterior, los rayos de luz se desvían por virtud del campo gravitatorio del Sol (curvándose hacia el cuerpo gravitatorio) los tres rayos forman el triángulo, como se ve en la Figura 32, y los astrónomos encontrarían que la suma de los tres ángulos es mayor de 180 grados.

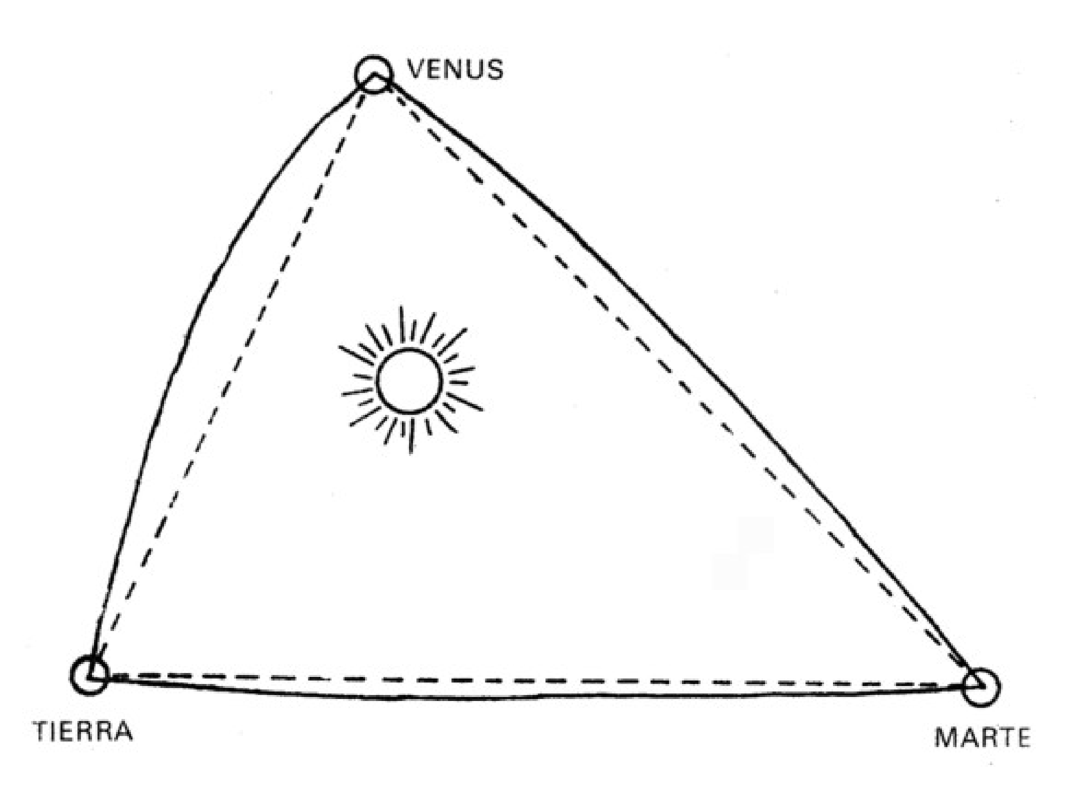


Figura 32. Triangulación del espacio en torno al Sol.

Así, pues, nuestros astrónomos deducirían que el espacio en torno al Sol es curvo, con una curvatura positiva. Si la medición se repite con los planetas Júpiter, Saturno y Urano que están a mayor distancia del Sol, la desviación de los rayos luminosos por la gravedad del Sol será menor y la suma de los tres ángulos se aproximará a los 180 grados, indicando que la curvatura del espacio en torno al Sol disminuye con la distancia a él. Se podría objetar contra esta interpretación de tales mediciones diciendo que lo que los astrónomos medían no es verdaderamente un triángulo regular, puesto que sus lados no son líneas rectas. Pero ¿qué es una línea recta? La única definición razonable es esta: "la línea de la visión", pero la línea de la visión es la línea de la propagación de la luz a través del espacio vacío. También

se puede definir la línea recta como "la distancia más corta entre dos puntos", pero toda la ciencia óptica está fundada sobre el postulado de que la luz sigue siempre el camino más corto. Si se piensa seriamente sobre la situación, se ve que no existe otra manera racional de definir una línea recta y que las líneas de trazo seguido en la Figura 32, deben ser consideradas como líneas "rectas" en un espacio "curvo" y que las líneas de puntos en esta figura no tienen ninguna significación física. Para evitar confusiones en la terminología, el término "línea recta" se reserva únicamente para las distancias más cortas en geometria plana mientras que en una superficie curva y un espacio curvo hablamos de "*líneas geodésicas*". Así, en la superficie de una esfera, el equivalente de las líneas rectas son los arcos de grandes círculos que usamos para trazar triángulos esféricos. Podemos damos cuenta de que en la geometria esférica, la antigua afirmación euclidiana de que "*las líneas paralelas nunca se encuentran*" no se sostiene, puesto que dos grandes círculos cualesquiera siempre se cortan en dos puntos y dos aviones que salen de dos puntos del ecuador en direcciones paralelas perpendiculares al ecuador y vuelan sin cambiar su camino chocarían al llegar al polo.

La equivalencia entre el campo gravitatorio y la curvatura del espacio puede ser aclarada mejor por el siguiente ejemplo bidimensional. Si empujamos una bola de billar sobre una mesa plana horizontal se moverá, desde luego, siguiendo una línea recta convencional. Pero si, por alguna razón, la mesa tiene una pequeña depresión y ligeras elevaciones en el camino de la bola, esta será desviada de su trayectoria "recta", corriendo hacia el centro de la depresión y lejos de la cima de la elevación. Si observamos el movimiento de una bola desde encima de la mesa (a través de un agujero en el techo), no nos daremos cuenta del defecto de la superficie de la mesa y nos inclinaríamos a creer que hay una cierta fuerza que atrae o repele la bola desde un cierto puno de la superficie de la mesa. Idénticamente, la desviación de los rayos de luz y el movimiento de los cuerpos materiales en la cercanía del Sol pueden ser interpretados, bien como una fuerza que actúa sobre ellos, bien como resultado de la curvatura del espacio en la proximidad de las grandes masas.

Miremos ahora nuestro problema desde otro ángulo y consideremos los fenómenos físicos como vistos por observadores situados sobre una gran plataforma giratoria (Figura 33). Este experimento mental es análogo al caso de la caja expuesto en la

sección anterior, con la diferencia, sin embargo, de que en lugar de una aceleración lineal (es decir, cambio del valor numérico de la velocidad sin cambio de dirección) tenemos una aceleración circular (cambio de la dirección de la velocidad sin cambiar de su valor numérico). Podemos añadir a esta plataforma giratoria una bóveda semiesférica girando con ella mediante la cual evitamos que las personas de la plataforma vean los árboles y casas que hay en torno. Como todo el mundo sabe, las personas que están en una plataforma giratoria experimentarán la fuerza centrífuga que los aparta del centro y que puede ser interpretada como una fuerza especial de gravedad que es repelente más bien que atractiva.

La analogía con la gravedad se refuerza por el hecho de que si uno de los hombres plantado firmemente sobre la plataforma, pone en ésta dos esferas, una pesada y otra ligera, las esferas se moverán juntas del mismo modo que dos objetos arrojados desde una torre. Como los hombres de la plataforma son físicos entrenados y conocen todos los razonamientos expuestos antes en este capítulo pueden relacionar este "campo pseudogravitatorio" con la geometría del espacio y tratar de realizar algunas mediciones geométricas.

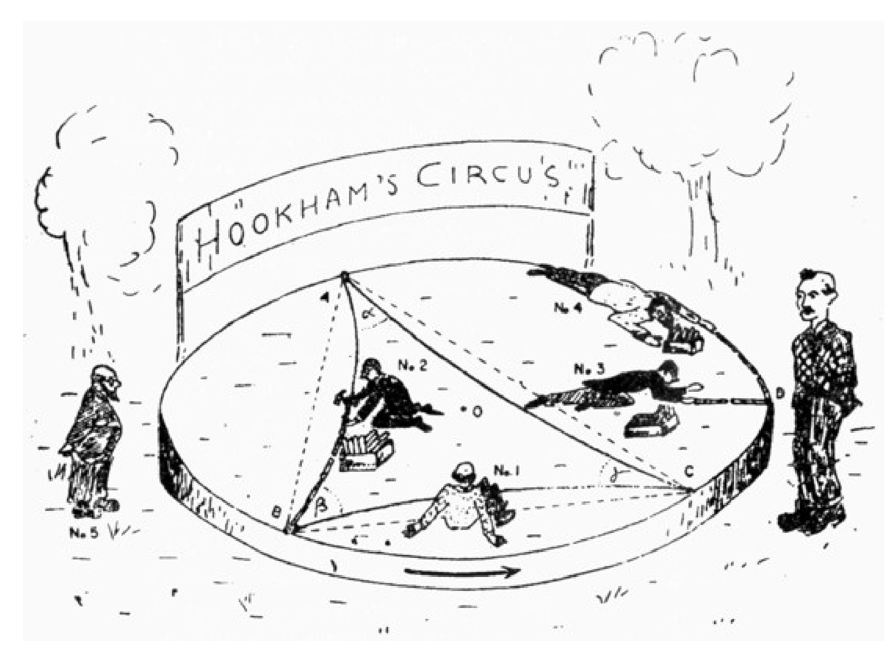


Figura 33. Estudios geométricos sobre una plataforma giratoria.

Primeramente, pueden tratar de construir un triángulo con los vértices A, B, y C y medir la suma de estos ángulos. Empleando la definición de la línea recta como la

distancia más corta entre dos puntos, el físico número 2 (el número 1 es el jefe que supervisa el trabajo) toma una caja de varas de madera, todas exactamente de la misma longitud, y trata de clavarlas en la línea entre los puntos A y B empleando el menor número posible de ellas. Si la plataforma no girase, el mejor modo de hacerlo sería seguir la línea de puntos que se ve en la figura. Pero en el caso de rotación, la situación cambia. Las varas se mueven ahora en la dirección de su longitud y están sometidas a la contracción de Fitzgerald; en efecto, el físico número 5, que está en el suelo, está seguro de ello. La vara del medio se mueve exactamente a lo largo de su longitud y sufre plenamente la contracción de Fitzgerald mientras que las varas más cercanas a la periferia tienen al menos una componente de velocidad a lo largo de su longitud. A causa del acortamiento se producirán espaciamientos entre las varillas, y el número 2 tendrá que añadir más varas para que la línea sea continua. Pero, al menos, hay un remedio para esta dificultad: Si las varas se mueven algo más hacia el centro de la plataforma sus velocidades lineales y, por tanto, su acortamiento se reducirá algo y serán necesarias menos varas suplementarias. Así, el número 2 colocará las varas como se ve en la figura y se verá obligado a hacer lo mismo para los otros dos lados del triángulo. La suma de los tres ángulos será ahora menor de 180 grados y los físicos de la plataforma deducirán que su espacio tiene curvatura negativa.

Debemos añadir que en el caso de que estos físicos decidan comprobar estos resultados por métodos ópticos, llegarán al mismo resultado. En efecto, como el campo de las fuerzas centrífugas es análogo en todos los respectos a un campo gravitatorio de repulsión los rayos de luz que enlazan los vértices A, B y C se desviarán lejos del centro de la plataforma y seguirán la trayectoria marcada por las varas de madera.

Ahora tenemos dos personas más sobre la plataforma, números 3 y 4 haciendo algo diferente. Están tratando de medir la razón de la circunferencia al diámetro, que en geometria plana se designa con la letra griega π. También en este caso la rotación de la plataforma origina dificultades: mientras el número 3 no tendrá inconvenientes a causa de que las varas que usa se mueven perpendicularmente a su longitud, haciéndose más delgadas sin cambiar su longitud; las varas empleadas por el número 4 sufrirán la máxima contracción de Fitzgerald y él tendrá que

emplear un número mucho mayor. Así, la razón de la circunferencia al diámetro medida en la plataforma resultará mayor que el número 3,1416..., empleado en geometria plana. Este resultado confirma otra vez la conclusión sobre la curvatura negativa del espacio.

Volvamos por un momento a la superficie curva de dos dimensiones y veamos qué ocurre si trazamos círculos sobre ella. En el globo, los círculos con el centro en el polo son llamados "paralelos" y es evidente que la razón de la longitud de un paralelo a su diámetro (medido a lo largo del meridiano) es menor que el número π.

En efecto, la longitud del ecuador (paralelo 0) dividida por la longitud del meridiano es solamente 2. La longitud de los paralelos aumenta más lentamente que sus radios medidos a lo largo del meridiano y para los paralelos 80, 70, 60, etc. (con radios de 10, 20. 30 grados, etc.), las longitudes aumentara más lentamente que 1, 2, 3, etc. Análogamente, el área de la superficie dentro de estos paralelos aumenta más lentamente que 1, 4, 9, etc. La situación contraria se da en una superficie de "silla de montar", en que la longitud de los círculos aumenta más rápidamente que sus radios y las áreas más rápidamente que el cuadrado de los radios. Si cortamos un trozo circular de cuero de un balón de fútbol y lo ponemos sobre la mesa, se combará en el centro y tendremos que tirar de la periferia si queremos que sea plano. Por el contrario, un trozo de cuero de una silla de montar tendrá mucho más cuero en el borde y tenemos que achicarlo para hacerlo plano. Por esta analogía tenemos de nuevo que atribuir al espacio dentro de un laboratorio giratorio una curvatura negativa.

En el caso del espacio tridimensional, la superficie de la esfera aumenta más lentamente que el cuadrado del radio y su volumen más lentamente que el cubo del radio en el caso de curvatura positiva, y lo contrario respecto al espacio de curvatura negativa. Este resultado matemático suministra una base para una investigación muy interesante en el campo de la astronomia que fue realizada por Edwin Hubble en el observatorio de Monte Wilson hace años. Hubble, que era un gran experto en galaxias estelares, de las cuales hay miles de millones esparcidas por el espacio cósmico dentro del alcance de los grandes telescopios, decidió investigar si el número de galaxias a distintas distancias de nosotros aumenta en proporción directa, o más lenta o más rápidamente que los cubos de estas

distancias. Si es verdad la primera posibilidad debemos deducir que el espacio del universo es euclidiano. En el segundo caso, el espacio tiene curvatura positiva y debe cerrarse sobre sí mismo. En el tercer caso, el espacio tiene una curvatura negativa y está abierto en todas direcciones. Desgraciadamente, la técnica de observación para la medición de distancias intergalácticas no estaba entonces suficientemente desarrollada y los resultados de Hubble eran contradictorios e inconcluyentes. Es de esperar que la repetición de la "cuenta de las galaxias" de Hubble con mejores medios de observación dará una respuesta a este importante problema de cosmología.

Llevado por las consideraciones expuestas, Einstein desarrolló una teoría según la cual todas las alteraciones gravitatorias deben ser interpretadas como debidas a la curvatura del espacio. Felizmente para Einstein un matemático alemán, Bernhard Riemann, había desarrollado muchas décadas antes una detallada teoría matemática de los espacios curvos de cualquier número de dimensiones, de modo que todo lo que Einstein tuvo que hacer fue aplicar las fórmulas matemáticas ya existentes al espacio curvo, físicamente real. Naturalmente, era un espacio tetra-dimensional con las coordenadas x, y, z, ict discutidas antes en este capítulo. Relacionando el llamado "tensor de curvatura" del continuo espacio-tiempo con la distribución y movimiento de las masas,

$$R_{\mu v} - \frac{1}{2} R g_{\mu v} = -k T_{\mu v}$$

Einstein pudo llegar a todos los resultados de la teoría de Newton en primera aproximación. Sin embargo, cálculos más exactos indicaron que debía de haber algunas pequeñas desviaciones de la primitiva teoría de Newton y el descubrimiento de estas desviaciones demostrarían la superioridad de la concepción de Einstein sobre la de Newton, una de las conclusiones de la teoría de la gravedad de Einstein, la desviación de la trayectoria de la luz en el campo gravitatorio, ya ha sido expuesta.

Otro punto importante se refiere al movimiento de los planetas en torno al Sol. Newton había demostrado que, según las leyes de gravedad, los planetas deben moverse en órbitas elípticas en torno al Sol de acuerdo con las leyes empíricas

descubiertas por Keplero. En la teoría de Einstein, todos los movimientos deben ser considerados en el mundo de cuatro dimensiones (x, y, z, ict) que es curvo si se presentan campos gravitatorios.

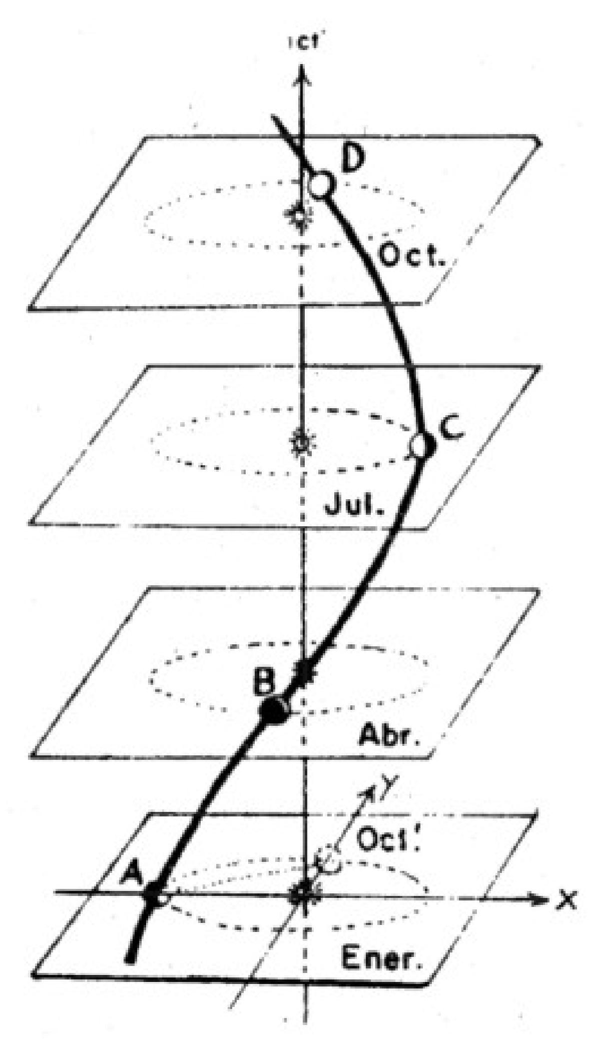


Figura 34. La línea cósmica de la Tierra en su movimiento alrededor del Sol, tratada en el sistema de coordenadas x, y, ict. La distancia dimensional espacio-tiempo entre las posiciones de la Tierra en enero y octubre es la distancia más corta. Pero la distancia entre la posición de enero y la proyección de la posición de octubre en el plano de enero (Oct') no es evidentemente la más corta.

Las líneas que representan la "historia del movimiento" de cualquier cuerpo material, llamadas "líneas cósmicas" deben ser las "geodésicas", es decir, las líneas más cortas y pueden ser calculadas sobre la base de la teoría relativista del campo gravitatorio.

En la Figura 34 damos una representación gráfica de la línea cósmica de la Tierra en su movimiento en torno al Sol. Las dos coordenadas de espacio x e y están tomadas en el plano de la elíptica, mientras la tercera es la coordenada de tiempo ict. El continuo espacio-tiempo en la vecindad del Sol es curvo, y la línea cósmica de la Tierra corresponde a la línea más corta (es decir, geodésica) en este espacio curvo. Así, la línea ABCD es la distancia más corta entre dos puntos (sucesos). A y D en el continuo espacio-tiempo tridimensional, y su proyección en el plano (x, y) es la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Los cálculos exactos han demostrado, sin embargo, que esta elipse no permanece estacionaria en el espacio como la teoría de Newton indica, sino que gira lentamente con su eje mayor inclinándose en un pequeño ángulo en el transcurso de cada revolución. El efecto debe ser más perceptible en el caso de la órbita de Mercurio, que es más alargada que las órbitas de otros planetas y que está más próximo al Sol. Einstein calculó que la órbita de Mercurio debe inclinarse 43 segundos angulares por cien años y resolvió de este modo el antiguo enigma de la mecánica celeste. Antes de que Einstein naciera, los astrónomos matemáticos calcularon que el eje mayor de Mercurio debe girar lentamente a causa de las perturbaciones, es decir, de las alteraciones gravitatorias de los otros planetas del sistema solar. Pero era una discrepancia entre los cálculos y las observaciones que daban los 43 segundos angulares por cien años que no se podía explicar. La teoría relativista de la gravitación de Einstein zanjó la cuestión y ha sido una conquista incontestable sobre la antigua teoría newtoniana.

14. La teoría del campo unificado

La obra de toda la vida de Einstein ha sido una geometrización de una gran parte de la física: el tiempo resultó ser un legítimo cuarto compañero de las tres coordenadas del espacio (excepto por el factor i), y las fuerzas de gravedad fueron interpretadas como debidas a la curvatura de este mundo tetradimensional. Pero las fuerzas eléctricas y magnéticas todavía quedaban fuera de esta conquista geométrica, y habiendo progresado hasta ese punto, Einstein dirigió toda su energía a poner sobre el irreductible campo electromagnético un rígido freno geométrico. ¿Cuál es la propiedad geométrica hasta ahora inexplorada del espacio tetradimensional que puede explicar las interacciones eléctricas y magnéticas? El propio Einstein y otros

muchos adláteres interesados, tal como el famoso matemático alemán Hermann Weyl, hicieron todo lo posible para dar al campo electromagnético una interpretación puramente geométrica. Pero con una típica terquedad escocesa la criatura de William Clerk Maxwell, el campo electromagnético, se negó a ser geometrizada. Durante casi cuarenta años hasta su muerte en 1955, Einstein trabajó en la llamada "teoría del campo unificado", es decir, la teoría que unificaría los campos gravitatorio y electromagnético sobre una sencilla base geométrica. Pero, conforme pasaban los años, la tarea se fue haciendo cada vez más imposible. Constantemente Einstein publicaba nuevas series de fórmulas que, a su juicio, estaban destinadas a resolver el enigma de la teoría del campo unificado, y estas complicadas expresiones tensorias fueron impresas en las primeras páginas del "New York Times" y otros diarios de todo el mundo. Pero siempre resultaba que las fórmulas no eran adecuadas para la finalidad y el silencio se hacía otra vez hasta la nueva revelación. Los físicos teóricos, jóvenes y viejos, fueron perdiendo gradualmente confianza en la posibilidad de dar al campo magnético una interpretación puramente geométrica. Hubiera sido magnífico que se pudiera haber logrado, pero no se puede forzar a la Naturaleza a hacer lo que no está en su naturaleza. Por otra parte, los físicos estaban haciendo rápidos progresos en los campos recientemente descubiertos y en adición a los clásicos campos gravitatorio y electromagnético los nuevos campos introducidos por la mecánica ondular ocuparon una firme posición en la ciencia. Si se da al campo electromagnético una interpretación puramente geométrica, tendríamos que domeñar los campos de los mesones, los campos de los hyperones y otros muchos nuevos campos para poder decir: la física no es otra cosa que geometria. El propio Einstein se fue haciendo cada vez más susceptible sobre esta tesis y cada vez más reacio a discutir estos problemas con otros físicos. Durante una de sus visitas a Inglaterra, al principio de los años treinta, dio una conferencia sobre la teoría del campo unificado en un colegio de muchachas en el norte de Inglaterra (la pizarra con las complicadas fórmulas tensorias ha sido conservada por las autoridades del colegio), pero se negó a hablar en la Universidad de Cambridge. Su atención se dedicó cada vez más al sionismo y a la paz mundial, pero su agilidad científica siguió siendo tan aguda como siempre. Cuando el autor de este libro acostumbraba a visitar a Einstein

durante la segunda guerra mundial en su tranquila casa de Princeton, le encontró tan encantador como siempre y recuerdo muchas conversaciones informativas e interesantes sobre varias ramas de la física moderna. Sobre su mesa de despacho había trozos de papel, cubiertos de complicadas fórmulas que evidentemente pertenecían a la teoría del campo unificado. Pero Einstein nunca hablaba de ello. Ahora está ciertamente en el Paraíso y debe saber si acertaba o se equivocaba en su intento de geometrizar toda la física.

Capítulo 7
La ley de los cuanta

1. Divisibilidad de la materia

Como todo el mundo sabe, el átomo (que en griego significa "indivisible") es un hijo intelectual de Demócrito que vivió y enseñó en Atenas hace veintitrés siglos. Demócrito consideraba inconcebible que los cuerpos materiales pudieran ser divididos en partes cada vez más pequeñas sin límite y postulaba que tenía que haber partículas últimas, tan pequeñas que no sería posible dividirlas en partes aún más pequeñas. Demócrito reconocía cuatro clases diferentes de átomos —los de la piedra, del agua, del aire y del fuego y creía que toda la diversidad de las materias conocidas resultaba de las diferentes combinaciones de estos cuatro elementos. Su concepción, que fue adoptada y firmemente fundamentada por la experimentación a principios del siglo XIX, por el químico inglés John Dalton, constituye la base de toda la química moderna, aunque sabemos que los átomos no son indivisibles y de hecho poseen una estructura interna muy complicada. Pero la idea de Demócrito de últimos elementos se ha transferido ahora a partículas mucho más pequeñas que constituyen la estructura interna del átomo y se puede esperar que los electrones, protones y otras llamadas "partículas elementales" sean real y verdaderamente elementales e indivisibles en el antiguo y buen sentido de las palabras de Demócrito. Puede ser que esta impresión derive de nuestra escasa —relativamente— familiaridad con estas partículas descubiertas recientemente y que estemos cometiendo el mismo error que los físicos y químicos del siglo XIX que creían que la divisibilidad de la materia se detenía en el átomo. Y también puede ocurrir, claro está, que si se descubre en el futuro que estas partículas elementales son estructuras complejas con nuevos nombres inventados para sus partes constituyentes, esto no demostrará que se ha llegado al fin y que años después se descubran partículas aún más pequeñas. Esto no es predecir en modo alguno los desarrollos científicos del porvenir, y la cuestión de si el original concepto filosófico de Demócrito de la indivisibilidad es correcto o equivocado nunca se decidirá por medios empíricos. Pero, en cierto modo, muchos científicos, incluyendo al autor, se sienten más dichosos pensando que en el estudio de la materia "las cosas llegarán

al fin" y que los físicos del futuro conocerán todo lo que se puede conocer sobre la estructura interna de la materia. También parece completamente plausible que las partículas elementales de la física moderna merecen su nombre en un ciento por ciento al hecho de que sus propiedades y comportamiento parece ser mucho más sencillo que lo que puede decirse de los átomos.

2. Un sopapo al viejo átomo

Hacia fines del siglo XIX, los físicos llevaron su atención al paso de la electricidad a través de los gases. Se sabía desde hacía siglos que los gases, que de ordinario son aisladores eléctricos bastante buenos, a veces pueden ser atravesados por tensiones eléctricas elevadas. La intensidad de la descarga fluctúa de las pequeñas chispas entre el tirador de la puerta y la mano del hombre que pasa por un piso alfombrado con zapatos de caucho y los potentes rayos de las grandes tormentas. Pero Sir William Crookes, cuyas contribuciones a la ciencia sólo han sido oscurecidas parcialmente por su creencia en el espiritismo y lo sobrenatural, ha demostrado que el paso de la electricidad a través de los gases se realiza de una manera mucho más tranquila si se reduce la presión del gas a una pequeña fracción de una atmósfera. Los tubos de Crookes brillaban con una luz tranquila de un color que dependía de la naturaleza del gas y siguen luciendo en las calles de las ciudades anunciando hoteles, clubs nocturnos y otras mil cosas. Cuando la presión del gas en un tubo al cual se aplica una elevada tensión eléctrica es suficientemente baja, aparece un haz perfectamente definido que va del cátodo al ánodo y choca contra el extremo del tubo si el revoltoso físico mueve el ánodo separándolo de la trayectoria del haz. Al chocar contra la pared de cristal, el misterioso rayo que emana del cátodo hace que brille con una difusa luz verdosa y cualquier objeto interpuesto en su camino arrojará sombras bien definidas. Al colocar un imán cerca del tubo, Crookes observó la desviación del rayo como ocurriría en el caso de una corriente eléctrica o un enjambre de partículas cargadas negativamente escapadas del cátodo. Hacia la misma fecha, Jean Perrin, en Francia, observó que una placa metálica colocada en el camino de este haz adquiría una carga eléctrica negativa. Todo parecía indicar que estas partículas deben estar cargadas negativamente al pasar a través de un gas enrarecido de la misma manera que los iones de Faraday se mueven a través

de los líquidos en el proceso de la electrolisis. La diferencia esencial era, desde luego, que mientras en el caso de la electrolisis, los iones tienen que abrirse su camino lentamente a través de las moléculas estrechamente apretadas del líquido y nunca pierden su rumbo al electrodo opuesto, los rayos catódicos (así se les llama) en los gases enrarecidos siguen la línea recta y chocan con cualquier cosa interpuesta en su trayectoria.

Estas ideas fueron combatidas por el físico alemán Philipp Lenard, que había visto que el rayo catódico puede pasar fácilmente a través de varias pantallas colocadas en su camino sin hacer agujeros en ellas como seguramente lo haría un haz de partículas materiales. Únicamente ondas pueden comportarse así y no un haz de partículas materiales, razonó Lenard. Por supuesto, hoy sabemos que han de rodearse las pilas atómicas con muros de cemento de muchos pies de espesor para detener los neutrones que emiten y causan enfermedades de radiación en el personal de la planta atómica; el razonamiento de Lenard parece bastante débil. Pero era un argumento muy fuerte en la época en que fue formulado.

La tarea de resolver las contradicciones experimentales de que los rayos catódicos son corrientes de partículas y de averiguar sus propiedades físicas, fue encomendada por el Consejo Supremo del Progreso de las Ciencias a Joseph John Thomson, más tarde Sir Joseph, físico nacido en Manchester que tenía entonces cuarenta años y era director del famoso Laboratorio Cavendish de Cambridge, uno de los principales centros de la física contemporánea. Suponiendo que los rayos catódicos están constituidos por partículas rápidas, Thomson decidió medir su masa y su carga eléctrica. Uno de los datos relativos a estas magnitudes fue la desviación de los rayos catódicos observada en el campo magnético (Figura 35 a). Esta desviación no depende únicamente de la carga y la masa de las partículas en movimiento, sino también de su velocidad, y mediante las mediciones se puede encontrar únicamente el producto masa·velocidad/carga o m·v/e en las anotaciones convencionales. Sin embargo, se deducía de la teoría que la desviación producida por el campo eléctrico dependía de otra combinación de las mismas cantidades, a saber del producto $m \cdot v/e^2$. Así, midiendo ambas desviaciones y combinando los resultados, Thomson encontró separadamente la velocidad de su movimiento v y la

relación de carga y masa e/m. Mientras v depende del potencial eléctrico aplicado al tubo, e/m era siempre el mismo, equivalente a $5{,}28 \cdot 10^{17}$ esu/gr[21].

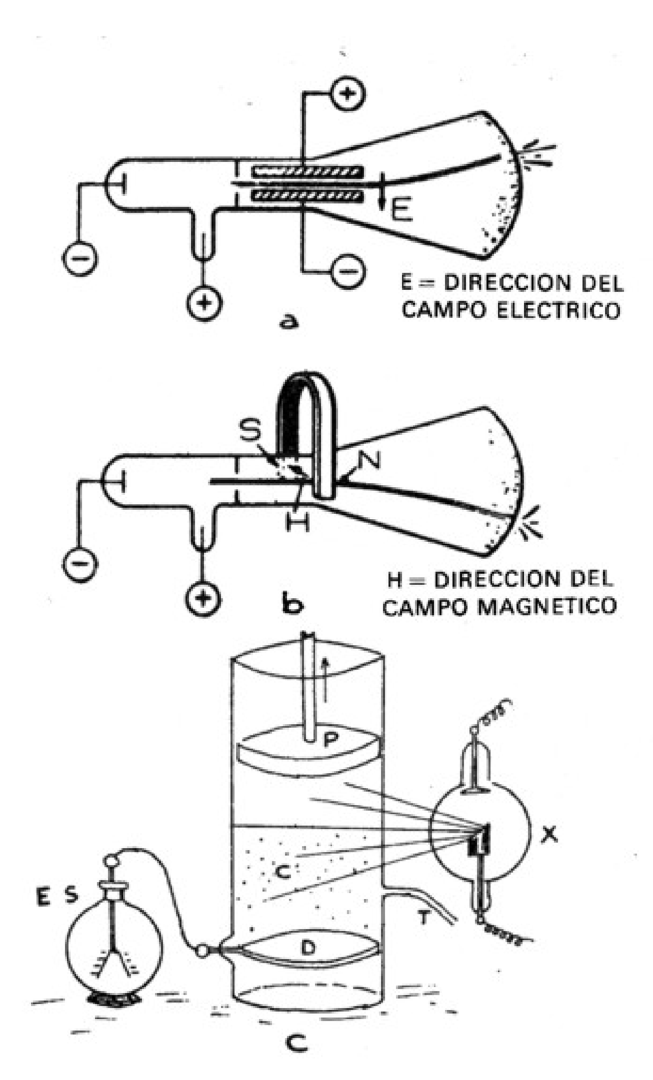


Figura 35. Medición por Thomson de la masa de un electrón. (a) La desviación en un campo eléctrico permite la medida de $m \cdot v_2/e$ (b) La desviación en un campo magnético permite la medición de m·v/e. Combinando los dos resultados se halla (c) La proporción de caída de las gotitas formadas sobre los iones del gas permite la medición de e. Conociendo e/m y e, se halla fácilmente m.

Aunque era casi seguro que e debía tener el mismo valor numérico que la carga eléctrica elemental encontrada por Faraday en sus experimentos de electrolisis de los líquidos, Thomson emprendió un experimento especial para medir este valor en los iones de gas. Su método se basaba en el descubrimiento de otro físico del

[21] esu es la unidad electrostática descrita en el Capítulo 5; gr es una unidad de masa.

Cavendish, C. T. R. Wilson, que había observado que si el aire sin polvo saturado de vapor de agua se enfría rápidamente por expansión, se forman gotitas de agua sobre cualquier ion que se pueda presentar[22]. Para las pequeñas expansiones (por debajo del 30 %) únicamente los iones negativos hacen de centros de condensación, mientras que para las grandes expansiones el vapor de agua se condensa tanto en los iones positivos como en los negativos. El esquema del experimento de Thomson aparece en la Figura 35 c. Consiste en un cilindro de cristal C con un pistón P y un disco de metal D enlatado con un electroscopio. El cilindro está lleno de aire húmedo a través del tubo T e iluminado por rayos X. Cuando se eleva súbitamente el pistón, produciendo la expansión del aire (menor que el 30%), aparece en la cámara una nube de niebla formada por. la condensación del agua sobre los iones negativos. La niebla se posa lentamente sobre el disco D y la carga eléctrica total de los iones se mide por el electroscopio. Conociendo la cantidad inicial de vapor de agua en el cilindro y el tamaño medio de las gotitas, se puede encontrar el número total de gotitas o, lo que es lo mismo, el número total de iones. Puesto que las gotitas son demasiado pequeñas para verlas, Thomson resolvió averiguar su tamaño por la velocidad con que la niebla se posa en el disco. Cuanto más pequeñas las gotas, tanto más lentamente se posan y existe una fórmula, deducida primeramente por Stokes, que establece una relación entre la velocidad de caída, el radio de la gota y la viscosidad del aire. Mediante este método y dividiendo el total de la carga registrada en el electroscopio por el número de gotitas, Thomson vio que la carga eléctrica de cada gota era del valor de $4{,}77 \cdot 10^{-10}$ esu, es decir, el mismo valor que en el caso de la electrólisis de los líquidos.

Entonces Thomson pudo encontrar el valor de m deduciéndolo de la razón previamente medida y resultó ser $0{,}9 \cdot 10^{-29}$ g, es decir, 1.840 veces más pequeña que la masa del átomo de hidrógeno.

Fue un gran descubrimiento: ¡una partícula casi dos mil veces más ligera que el más ligero de los átomos! Thomson concluyó que mientras los iones de Faraday eran átomos que transportaban cargas, las partículas que forman los rayos catódicos eran cargas eléctricas y les dio el nombre de electrones. Consideraba el

[22] Si el aire contiene algún polvo, la saturación del vapor se producirá primero sobre estas partículas de polvo, confundiendo el experimento.

átomo como una esfera de material cargado positivamente con una multitud de electrones esparcidos por su cuerpo como las pepitas negras en la roja carne de una sandia. Esto era, por así decir, un "modelo estático"; es decir, se suponía que los electrones estaban en reposo dentro del átomo en cierto equilibrio determinado por el equilibrio de las fuerzas de repulsión electrostática entre los electrones cargados negativamente y las fuerzas de atracción electrostática entre los electrones y el centro del cuerpo del átomo cargados positivamente.

Cuando un átomo es excitado, es decir, recibe un exceso de energía del exterior, se supuso que los electrones oscilaban en su interior sobre sus posiciones de equilibrio, emitiendo ondas electromagnéticas (luz) de varias longitudes. Se hicieron laboriosos cálculos para relacionar las frecuencias de vibración de las diferentes configuraciones electrónicas con las rayas observadas en los espectros de varios elementos químicos, pero el trabajo resultó inútil y el problema quedó sin resolver hasta la aparición del modelo atómico de Rutherford.

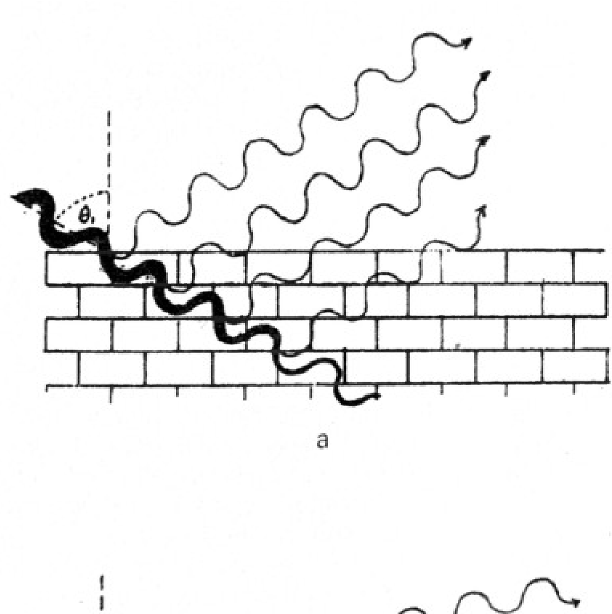
3. Los misteriosos rayos X

Una serie de descubrimientos importantes realizados hacia finales del siglo XIX y que transformaron rápidamente la física, desde su forma "clásica" hasta la "moderna", ocurrieron accidentalmente. Pero en estos descubrimientos siempre estaban implicados físicos de mente aguda y atención alerta para darse cuenta de cosas inusitadas y proseguir su estudio hasta deducir hechos importantes. El 10 de noviembre de 1895, el físico alemán Wilhelm Konrad Roentgen, que realizaba algunos experimentos con los rayos catódicos de un tubo de Crookes, advirtió que una pantalla fluorescente, que por casualidad estaba cerca sobre una mesa, se hacía luminosa cuando la corriente eléctrica pasaba a través del tubo. Roentgen cubrió entonces el tubo con un trozo de papel negro, pero la fluorescencia no se desvanecía. Una lámina de metal, por otra parte, detenía definitivamente el efecto. Así, se trataba de una nueva radiación emanada del tubo que podía pasar fácilmente a través de materias opacas a la luz ordinaria. La primera fotografía que Roentgen tomó valiéndose de la radiación recién descubierta, que llamó rayos X, fue la mano de su mujer, que dejó ver claramente la estructura ósea y su anillo de boda. Estudios posteriores indicaron que esta penetrante radiación procedía del

extremo del tubo de cristal con el que chocaba el haz de rayos catódicos. La intensidad de los rayos X podía aumentarse considerablemente colocando en la trayectoria de los rayos catódicos una placa de metal pesado llamada "anticátodo". Se supuso que la emisión de rayos X es debida al impacto de los electrones rápidos que constituyen los rayos catódicos (como se recordará los electrones fueron descubiertos por Thomson dos años después) contra el blanco situado en su camino. Al ser detenidos súbitamente en su rumbo, los electrones desprenden su energía cinética en la forma de ondas electromagnéticas muy cortas, similares a las ondas sonoras que resultan del choque de las balas contra un blindaje. Y exactamente como en el caso de las balas, el sonido emitido contiene todas las posibles frecuencias y se describe como "ruido" más bien que como una nota musical; los rayos X representan una mezcla de un continuo de longitudes de onda. Los alemanes lo llaman "Bremsstrahlung" ("Bremse" significa freno y "Strahlung" radiación) y este término se usa habitualmente en inglés, como otros muchos términos alemanes.

Como los rayos X no son desviados por el campo magnético, Roentgen supuso desde el principio que eran vibraciones análogas a las de la luz ordinaria. En este caso, debían mostrar el fenómeno de difracción y Roentgen empleó varios anos en intentar probarlo experimentalmente pero sin ningún resultado positivo. Doce años después de su gran descubrimiento, Roentgen, que era a la sazón profesor de física experimental en la Universidad de Munich, fue invitado por un joven físico teórico (entonces de 33 años), Max von Laue, de la misma Universidad, a ver algunas fotografías que acababan de ser tomadas por los ayudantes W. Friedrich y P. Knipping. A la primera mirada se dio cuenta de que era exactamente lo que había estado buscando durante años: las bellas fotos de difracción producidas por los rayos X que pasan a través de un cristal. A Von Laue se le ocurrió la idea de emplear un cristal como retícula de difracción sobre la base de consideraciones puramente teóricas. Como los rayos X no muestran fenómenos de difracción cuando se usan reticulares ópticos corrientes, debían tener longitudes de onda mucho más pequeñas. Ahora bien, la retícula cristalina está constituida por capas regulares de átomos o moléculas separadas 10^{-8} cm.

Cuando un haz de rayos X incide sobre una superficie cristalina penetra profundamente en el cristal siendo reflejado parcialmente por cada capa que atraviesa (Figura 36).



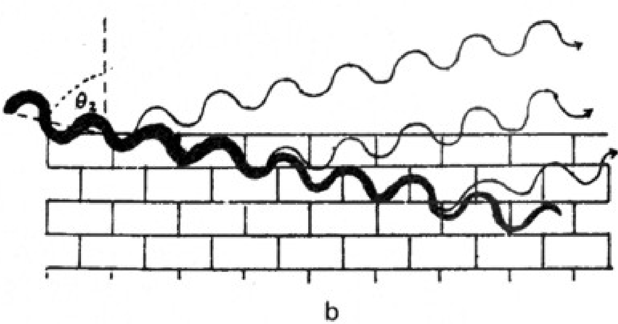


Figura 36. Reflexión de rayos X o de ondas de Broglie por la superficie de un cristal. En (a), las pequeñas ondas reflejadas por las sucesivas capas de la celosía de cristal (representadas por ladrillos) están en fase contraría se anulan unas a otras. En (b), las pequeñas ondas están en la misma fase y de ello resulta un aumento de la intensidad.

Si el ángulo de incidencia es tal (b) que las pequeñas ondas reflejadas coinciden en fase la intensidad del rayo reflejado habrá aumentado. Para el otro ángulo (a), en que las pequeñas ondas están fuera de fase, debe esperarse oscuridad. Lo mismo que en el caso de las retículas ópticas, los dibujos de difracción pueden ser observados tanto en los rayos reflejados como en los transmitidos. La situación está complicada por el hecho de que los cristales tienen muchos sistemas de capas

moleculares paralelas de modo que la foto parece más complicada que en el caso de la luz ordinaria.

Más tarde se descubrió que, aparte de la continua "Bremsstrahlung', los rayos X contenían también la serie de finas líneas absolutamente similares a los espectros ópticos y se originaría por transiciones electrónicas profundas dentro de los átomos. Muchos estudios sobre las rayas del espectro de los rayos X se deben a W. Brag (padre) y W. L. Brag (hijo) que desarrollaron los métodos precisos de la espectrografía de los rayos X.

4. Isótopos

A principios del siglo XIX, un químico inglés, W. Prout, impresionado por el hecho de que los pesos atómicos de varios elementos expresados en términos del peso atómico del hidrógeno, estaban representados muy aproximadamente por números enteros, concibió la hipótesis de que los átomos de los diferentes elementos químicos no son otra cosa que aglomerados de diferentes números de átomos de hidrógeno: helio = 4 hidrógenos; carbono = 12 hidrógenos; oxigeno = 16 hidrógenos. Sus contemporáneos no participaban de esta opinión y en seguida señalaron una serie de hechos que contradecían su audaz hipótesis. Así, por ejemplo, el peso del cloro y del cadmio se vio que era 35,457 y 112,41 respectivamente, que estaban aproximadamente a la mitad entre dos números enteros. Así, para los elementos con pesos atómicos cercanos al entero, los valores son siempre algo menores que lo que se podía esperar si sus átomos estuvieran formados por la agregación de átomos de hidrógeno. Como el peso atómico del hidrógeno es 1,00803[23], la cifra para el helio debiera ser 4·1,0080 = 4,0320 mientras que en realidad es 4,003, es decir, un 0,8 % menor. Del mismo modo, doce átomos de hidrógeno juntos pesarían 12·1,0080 = 12,096, mientras que el peso atómico del carbono medido químicamente no es más que de 12,010.

Como resultado de estas "evidentes" discrepancias, la hipótesis de Prout fue rechazada y olvidada por casi medio siglo hasta su gloriosa resurrección en 1907 como resultado de los estudios de J. J. Thomson.

---

[23] Los químicos ajustan sus pesos atómicos para que el peso atómico del oxigeno resulte igual a 16.0000000000.

Después de establecer la existencia del electrón y haber medido su masa y su carga por la desviación de los haces de electrones en los campos eléctrico y magnético, Thomson volvió su atención a las partículas que se mueven en dirección contraria a través de los tubos de descarga eléctrica. Los haces de estas partículas cargadas positivamente fueron conocidos con el nombre de "rayos canales" porque fueron observados primeramente perforando agujeros (canales) en la placa del cátodo que permitía a las partículas pasar a su través al espacio posterior.

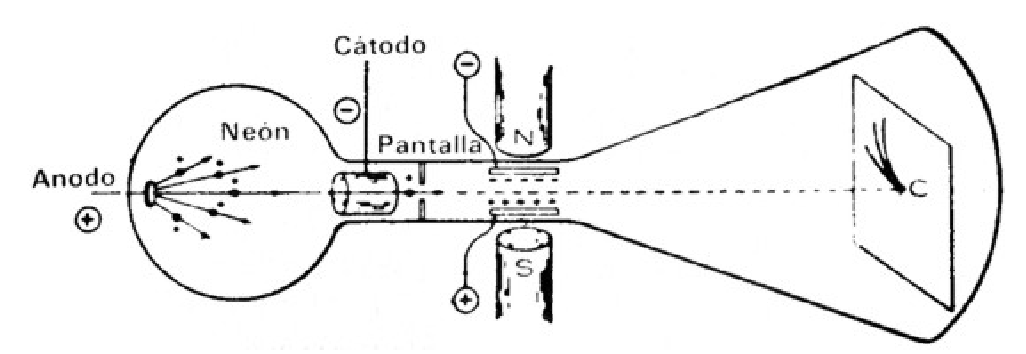


Figura 37. Aparato de Thomson para el estudio de los rayos canales. Los iones positivos que se mueven del ánodo al cátodo pasan a través de canales abiertos en el cátodo, y después de pasar por una pantalla entran en la región del campo eléctrico y magnético orientados en la misma dirección. Como la desviación magnética (en la dirección horizontal) depende de la velocidad de las partículas, mientras la desviación magnética (en dirección vertical) depende del cuadrado de esta velocidad, las partículas de la misma masa, pero que se mueven con velocidades diferentes, serán distribuidas a lo largo de una parábola en la pantalla C.

El aparato empleado por Thomson para estudiar los rayos canales aparece en la Figura 37 y está basado en el mismo principio empleado en sus estudios de las corrientes de electrones. Partículas cargadas positivamente, originadas en la descarga del gas entre el ánodo y el cátodo, pasaban a través de un agujero (canal) perforado en el cátodo y entraban en la región de los campos eléctrico y magnético orientados en la misma dirección. Como antes quedó expuesto, la desviación vertical del rayo producida por el campo eléctrico es proporcional a ev^2/m mientras que la desviación horizontal debida al campo magnético varía como a ev/m. Así, para las partículas con la misma razón de carga a masa pero con diferentes velocidades, las desviaciones verticales son proporcionales a los cuadrados de las

desviaciones horizontales y las curvas recogidas en la pantalla fluorescente S tienen que ser parábolas.

Esto fue exactamente lo que observó Thomson, pero en lugar de una sola parábola (para cada elemento químico dado) había dos o más indicando la presencia de átomos de masa diferente. Por ejemplo, en el cloro se obtuvo una parábola para átomos de cloro con masa 34,98 y otra para átomos de cloro, con masa 36,98, ambas cifras muy próximas a números enteros. Los átomos del mismo elemento que, sin embargo, tenían diferentes pesos atómicos fueron llamados "isótopos", es decir, que ocupan el mismo lugar en la tabla de Mendeleiev. El número relativo de los átomos de cloro con estos dos diferentes pesos atómicos (medido por el ennegrecimiento de la placa fotográfica) resultó ser 75,4% y 24,6%, respectivamente. Así, pues, el peso atómico medio sería 34,98·0,754 + 36,98·0,946 = 35.457, que coincide exactamente con el peso atómico del cloro medido químicamente. Estudios posteriores de F. W. Aston han demostrado que lo mismo ocurre respecto a otros elementos químicos. Así, por ejemplo, el cadmio consta de ocho clases diferentes de átomos con los pesos 106, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 116, y las cantidades relativas de 1,4; 1,0, 12,8; 13,0; 24,2; 12,3; 28,0 y 7,3%; el peso medio es 112,41 en perfecto acuerdo con las mediciones químicas. Así fue cómo la vieja idea de Prout volvió a cobrar toda su importancia.

Pero aun con el descubrimiento de los isótopos perduraban algunas discrepancias, puesto que, por ejemplo, los pesos atómicos exactos de los dos isótopos del cloro eran 34,98, y 36,98 en lugar de 35,280 (= 35·1,008) y 37,296 (= 37·1,008). Pero esto no fue una dificultad sino una satisfacción puesto que, según la ley de la equivalencia masa-energía de Einstein, la combinación de varias partículas debe pesar menos que las partículas primitivas por la cantidad de la energía recíproca que las une dividida por c^2. Así, la diferencia entre la masa de un átomo compuesto y la masa combinada de sus constituyentes nos hace conocer la energía implicada en el proceso de formación. Tomemos, por ejemplo, el átomo de carbono $_6C^{12}$ compuesto de 6 protones y 6 neutrones. La masa exacta de un átomo de hidrógeno es 1,008131 mientras para un neutrón es de 1,008945. Así, la masa total debe ser 6·1,008131 + 6·1,008945=12,102456. Sin embargo, las mediciones exactas dan para la masa del átomo de carbono el valor 12,003882, es decir, 0,098546 unidades

menos. El llamado "defecto de masa" debe representar la masa de la energía liberada en la formación del núcleo del carbono por los neutrones y protones. De acuerdo con Einstein, esto corresponde a la energía[24] $0,0986 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \cdot 9 \cdot 10^{20} = 1,48 \cdot 10^{-4}$ ergios ó 92,5 msv (abreviatura de un millón de electronesvoltios).

5. El modelo atómico de Rutherford.

Ernest Rutherford, nació en 1871, cerca de la ciudad de Nelson, en la isla meridional de Nueva Zelanda, y cuando años después recibió un título inglés por sus méritos científicos fue Lord Rutherford de Nelson. A sus veinticuatro años llegó a Cambridge para estudiar con Thomson en el Cavendish Laboratory y después de su graduación recibió una cátedra en la Universidad McGill de Montreal, donde realizó su primera contribución importante al estudio de los fenómenos de radiactividad recién descubiertos. Más tarde se trasladó a la Universidad de Manchester, y en 1919, después de la jubilación de Thomson fue nombrado director del Cavendish. Entre sus colegas era conocido por el apodo de "cocodrilo" que, le dio uno de sus discípulos favoritos, el físico ruso Peter Kapitza. Deber señalarse que mientras para los ingleses, que van a menudo a Egipto y son mordidos o comidos por los cocodrilos, este apodo suena como bastante peyorativo, para los rusos, que nunca han visto cocodrilos en su país, es un símbolo de fuerza potente. Mientras nadie se atrevía a mencionar este apodo en su presencia, Rutherford lo sabía y estaba secretamente orgulloso de él; el muro del nuevo edificio construido para los estudios de Kapitza sobre campos magnéticos muy potentes, tenía, por una razón que nunca se declaró oficialmente, un gran bajorrelieve de un cocodrilo.

Pero volvamos a los años de Rutherford en Manchester. No le gustaba el modelo de átomo a modo de sandía y decidió probar el interior atómico disparando a su través las nuevas clases de proyectiles que el descubrimiento de la radiactividad había puesto en manos de los físicos. Durante sus primeros años en la Universidad McGill, Rutherford había demostrado que las llamadas partículas "alfa" emitidas por varios elementos radiactivos eran en realidad haces de iones de helio cargados positivamente, expulsados con enorme energía de los átomos inestables.

---

[24] $1,66 \cdot 10^{-24}$ g es 1/16 de la masa de un átomo de oxigeno

Por la interacción con las partes cargadas del átomo, las partículas "alfa" deben desviarse de su trayectoria originaría y la dispersión resultante del haz debe revelar datos acerca de la distribución de las cargas eléctricas en el interior del átomo.

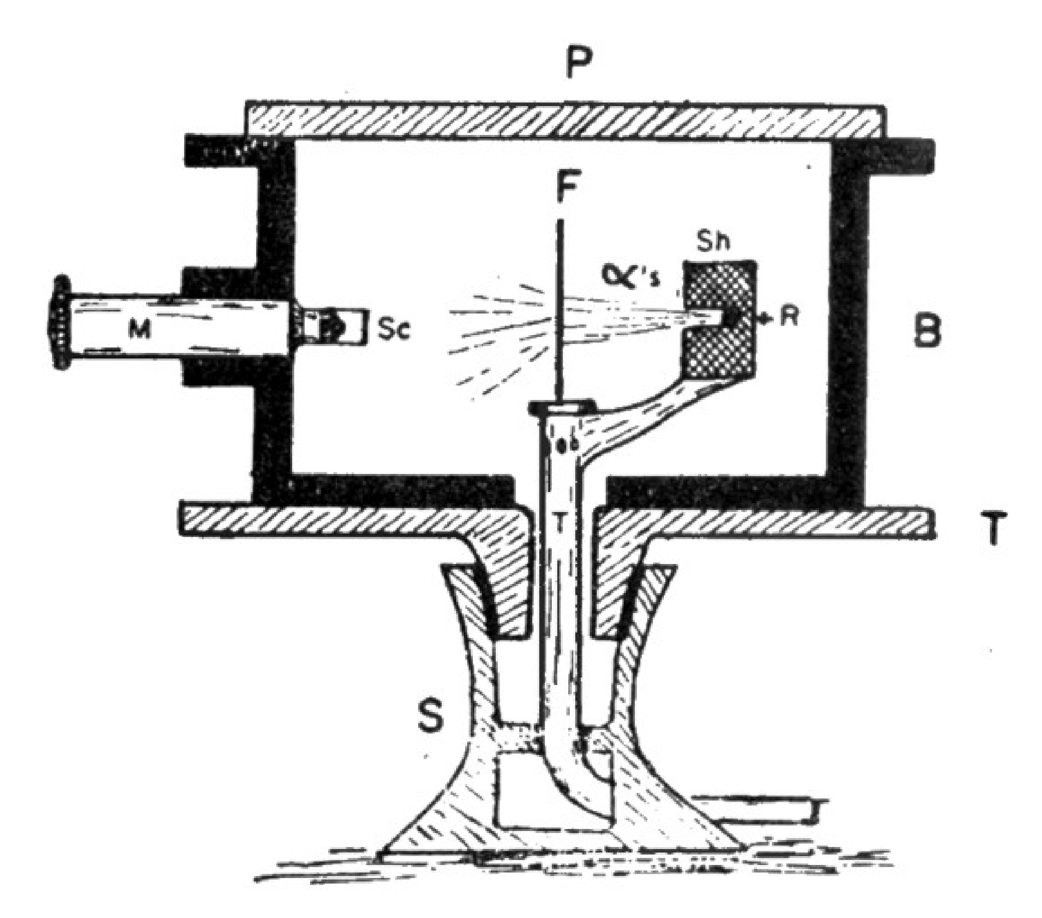


Figura 38. El primer aparato para el estudio de la dispersión de los rayos alfa. Una caja en que se ha hecho el vacío B con una placa superior P movible está colocada sobre una mesa rotatoria T. La fuente radiactiva R, colocada en una lámina de plomo Sb, y el filamento F de dispersión están fijos al pedestal S. Un microscopio con la pantalla de escintilación Sc está fijo en la caja y puede girar en torno al eje horizontal.

Así, Rutherford dirigía haces de partículas alfa sobre delgadas hojas de diferentes metales (Figura 38) y contaba el número de partículas dispersadas en diferentes direcciones después de haber pasado a través de la boja. En aquellas fechas, contar las partículas era un procedimiento laborioso. Mientras hoy un físico puede instalar un contador automático Geiger e irse de paseo o al cine, Rutherford tenía que mirar a través de un microscopio una pantalla fluorescente situada en la trayectoria de los

rayos y contar con sus dedos los centelleos, es decir, las pequeñas chispas que se producían cuando una partícula de elevada energía chocaba contra la pantalla. Algunos físicos nucleares tomaban en aquel tiempo belladona para abrir más las pupilas de sus ojos. Como resultado de estos estudios, Rutherford encontró que la dispersión de las partículas alfa que pasaban a través de las hojas metálicas era considerable. Aunque la mayoría de las partículas del rayo incidente permanecían en su dirección original de movimiento, cierto número eran desviadas muchos grados y algunas incluso eran rechazadas. Este resultado no se acomodaba en absoluto a lo que podía esperarse del modelo de Thomson, en el cual la masa y las cargas positivas se distribuían casi uniformemente por todo el cuerpo del átomo. En realidad, en este caso, la interacción entre la carga de la partícula incidente y la carga interna del átomo no sería bastante fuerte para desviar una partícula alfa en un gran ángulo respecto a su dirección original, sin mencionar la posibilidad de ser rechazada. La única explicación posible era que la carga positiva y la masa de un átomo están concentradas en una región muy pequeña, prácticamente en un punto, en el verdadero centro del átomo. Para ver si tal suposición está de acuerdo con la dispersión observada tuvo que encontrarse una fórmula basada en las leyes de la mecánica para la desviación de las partículas que pasaban a distintas distancias del centro de repulsión. Como a muchos grandes experimentadores, a Rutherford no le gustaban las matemáticas y, al menos según las habladurías, esta fórmula fue deducida para él por un joven matemático, R. H. Fowler, que más tarde se casó con su hija. Según la fórmula de Rutherford, el número de partículas alfa desviadas en un ángulo Θ de la dirección original de su movimiento debe ser inversamente proporcional a la cuarta potencia inversa del seno $\Theta/2$, y esta conclusión concordaba exactamente con las curvas de dispersión observadas. Así, pues, surgió una concepción enteramente nueva del átomo, con un núcleo central, pequeño pero de gran masa y fuertemente cargado, que Rutherford llamó el núcleo atómico y un enjambre de electrones girando a su alrededor bajo la acción de la atracción de Coulomb. Parecía más o menos como nuestro sistema de planetas circulando en torno al Sol y mantenidos en sus órbitas por las fuerzas de la gravedad newtoniana. Más tarde, dos discípulos de Rutherford, H. Geiger y E. Marsden, establecieron que la carga positiva del núcleo atómico, que es la misma que el número de electrones

que giran a su alrededor, es igual al número de la posición o número atómico del elemento en cuestión en el sistema periódico de elementos de Mendeleiev. Así es como se llegó a la actual concepción de la estructura del átomo.

6. La catástrofe ultravioleta

Debemos retroceder un trecho en la historia hasta los últimos diez años del siglo XIX cuando los físicos estaban atravesando las angustias de la metamorfosis desde la larva clásica a la mariposa moderna. En aquellas fechas se estaba desarrollando la teoría cinética del calor por obra de Boltzmann, Maxwell y otros y no había duda de que lo que llamamos "calor" es el resultado del movimiento irregular al azar de las innumerables moléculas que constituyen todos los cuerpos materiales. En el caso más sencillo, el de los gases, en el cual las moléculas se mueven libremente en el espacio, se puede deducir expresiones matemáticas sencillas de la distribución de velocidades, el número de colisiones intermoleculares y otras características moleculares de los fenómenos térmicos. En este estado de la cuestión, un famoso físico, astrónomo y autor de libros de divulgación, Sir James Jeans, decidió aplicar los métodos estadísticos, que se habían mostrado tan eficaces en el estudio del movimiento térmico de las moléculas, al problema de la radiación térmica. Hemos visto en el Capítulo 4 que los cuerpos calientes emiten espectros continuos de luz con vibraciones de todas las frecuencias y todas las longitudes de onda. Hemos visto también que, para cada temperatura dada, existe una cierta distribución de la energía disponible entre las diferentes longitudes de onda y que la longitud de onda correspondiente a la máxima concentración de energía cambia cuando cambia la temperatura (Figura 22). Jeans se preguntó si la distribución de energía entre las diferentes longitudes de onda en el caso de la radiación está sujeta a las mismas leyes estadísticas que la distribución de la energía entre las moléculas de gas. Veamos el llamado "cubo de Jeans", que es una caja formada por "espejos ideales", es decir, espejos que reflejan el 100 % de la luz que cae sobre ellos. Claro es que todo espejo absorbe parte de la luz incidente antes de reflejarla, pero estamos tratando de un "experimento mental" análogo a la caja de Einstein en la teoría relativista de la gravitación. Este cubo de Jeans tiene una ventanita y un obturador en ella; entonces podemos abrir el obturador, entender la luz de una lámpara y

aprisionar la luz cerrando el obturador. Como la luz no puede ser absorbida por las paredes de la caja, sufre innumerables reflexiones, y si una hora o dos después, abrimos el obturador otra vez, la luz saldrá de la caja como el gas sale por la válvula abierta de un neumático de automóvil.

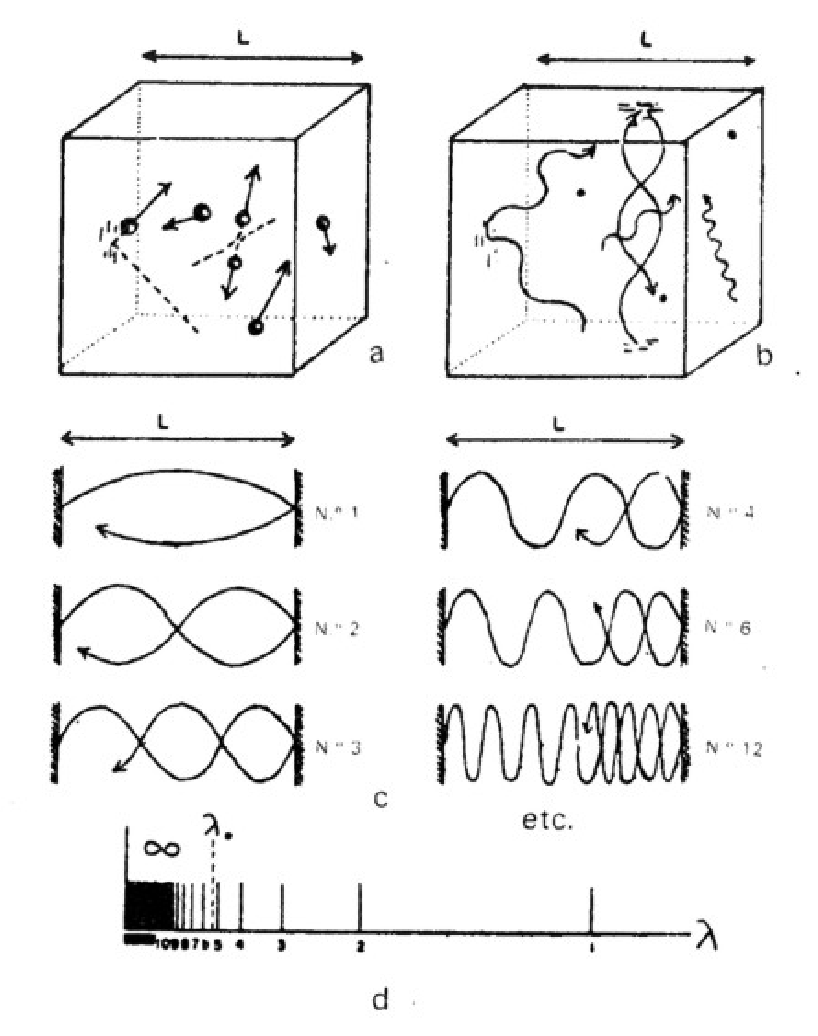


Figura 39. Comparación entre el movimiento al azar de las moléculas de gas en un recinto cerrado (a) y el movimiento al azar de las ondas en el cubo de Jeans (b). Los puntos negros en (b) representan diminutas partículas de polvo de carbón que sirven como cambiadores de energía entre las ondas. (c) Representa varios modos de vibraciones en el cubo de Jeans (en el caso de una dimensión para mayor simplificación) mientras (d) representa el espectro correspondiente.

En la Figura 39 damos una comparación entre dos cajas, una llena con moléculas en movimiento térmico y otra con radiación térmica de varias longitudes de onda. En el primer caso, las moléculas se mueven en el espacio en todas las direcciones

posibles con todas las posibles velocidades, reflejadas por las paredes de la caja y chocan ocasionalmente entre sí en su movimiento. En el segundo caso, tenemos ondas luminosas de varias longitudes que se propagan en todas las direcciones posibles y que son reflejadas por las paredes de espejos.

En el segundo dibujo faltan las "colisiones entre las ondas" que permitirían el cambio de energía entre ellas. Realmente, la propiedad básica de todas las clases de ondas, sean olas del océano, ondas sonoras u ondas de radio y de luz, es que no influyen unas sobre otras cuando se encuentran. Las ondas de proa de dos barcos que navegan uno al lado del otro, las ondas sonoras que transmiten la conversación de varias personas en una habitación, las ondas de radio de dos emisoras situadas en la misma ciudad o los dos haces de luz de dos reflectores que se cruzan en el cielo, pasan unas a través de otras como si fueran dos fantasmas medievales. Para eliminar esta falta de analogía, imaginemos dentro del cubo de Jeans dos pequeñas partículas de polvo de carbón que pueden absorber alguna energía de una longitud de onda y las hacemos pasar a otra longitud de onda. Hablamos figurativamente de polvo de carbón porque es negro y es sabido que los cuerpos negros (o más bien, los cuerpos negros ideales para emparejarlos con los espejos ideales del cubo de Jeans) absorberían y emitirían la radiación de cualquier longitud de onda. En este experimento mental se introducen las partículas de polvo de carbón precisamente para permitir el intercambio de energía entre las vibraciones luminosas de diferentes longitudes de onda. Pueden hacerlo sin restar energía del sistema a causa de su diminuto tamaño y la correspondientemente pequeña capacidad calorífica.

Veamos ahora cómo la energía disponible estará distribuida entre las diferentes vibraciones que puede haber en el cubo de Jeans. En la física estadística hay una norma básica conocida como la "ley de equipartición de la energía", según la cual si tenemos un número muy grande de sistemas (tales como las diferentes moléculas de gas) que están en interacción estadística entre ellas, la energía disponible estará por término medio distribuida igualmente entre todas ellas. Así, pues, si están juntas N moléculas de gas en la caja y el total de energía disponible es E, cada molécula tendrá una energía media:

$$\in = E/N$$

La misma sencilla ley debe ser aplicable a la multitud de ondas que pueden existir dentro del cubo de Jeans. Pero ¿cuántas de esas ondas puede haber allí? Considerando, para mayor sencillez, únicamente las ondas que marchan horizontalmente entre las paredes de la derecha y la izquierda de la caja (Figura 39 c) vemos que la situación es idéntica a la de una cuerda de violín asegurada a los dos extremos (compárese con los estudios de Pitágoras descritos en el Capítulo 1). La onda más larga será la número 1 con una longitud de onda doble que la distancia entre las dos paredes. La más corta será la número 2, con una longitud de onda L o, lo que es lo mismo, 2L/2. Las ondas 2L/3, 2L/4, 2L/5, 2L/6 (ó L/3),..., 2L/100, 2L/101,..., 2L/1.000.000...

No hay límite inferior para las posibles longitudes de onda de las vibraciones electromagnéticas y, continuando la serie anterior, pasaríamos a través de la luz visible, a la ultravioleta, a los rayos X, a los rayos gamma y así sucesivamente. Así, pues, el número de posibles vibraciones es infinito y, generalizando este razonamiento para las ondas que se propagan en todas las tres direcciones obtenemos, desde luego, el mismo resultado. Así, siguiendo a la ley clásica de equipartición y dividiendo la energía disponible, cualquiera que sea su magnitud, entre todas las ondas posibles tenemos:

$$\in = E/\infty = 0$$

Físicamente esta fórmula significa lo siguiente: Si dividimos todas las longitudes posibles de ondas dibujadas en la Figura 39 d en dos grupos por una línea vertical λ_0, habrá siempre un número finito de vibraciones posibles a la derecha de λ_0 pero un número infinito entre λ_0 y el punto cero. El principio de equipartición exigirá que toda la energía disponible sea dada a las vibraciones con longitud de onda más corta que λ_0, por pequeña que sea λ_0. Por tanto, si llenamos el cubo de Jeans con luz roja, esta luz comenzará a convertirse (por virtud de la absorción y reemisión por el polvo de carbón) en rayos ultravioletas, rayos X, rayos gamma, etc. Esto que es verdad para el hipotético cubo de Jeans debe ser verdad en general, y al abrir la

puerta del horno en la cocina o el cierre del hogar de una locomotora, seríamos alcanzados por la mortal radiación de las ondas cortas y moriríamos inmediatamente. Esta conclusión es evidentemente absurda, pero, por otra parte, resulta de la aplicación de las leyes más fundamentales de la física a la energía radiante.

Durante muchos años después de la publicación del artículo de Jeans, ni él ni ningún otro supo cómo explicar este resultado paradójico. Pero después, en la última semana del último año del siglo XIX, un físico alemán, Max Planck, subió a la pizarra, en la reunión de Navidad de la Sociedad Física Alemana y expuso una tesis extraordinaria. La idea era que la luz y todas las demás clases de radiación electromagnética, que siempre eran consideradas como trenes continuos de ondas, consisten realmente en paquetes individuales de energía con cantidades bien definidas de energía por paquete. La cantidad de energía por paquete depende de su frecuencia de vibración ϑ y es directamente proporcional a ella, de modo que se puede escribir esta fórmula:

$$c = h\vartheta$$

en que h es una constante universal. Planck llamó a estos paquetes de energía *cuanta de luz* (o, más generalmente, *cuanta de radiación*) y la constante h es conocida como constante cuántica.

Ahora bien, ¿cómo esta idea revolucionaría de Max Planck eliminaba el peligro de la "catástrofe ultravioleta" de Jeans? Para dar al lector un vislumbre de cómo puede ser, consideremos el caso de un hombre que muere dejando una herencia, por ejemplo, de 600 dólares. No tiene herederos, sino únicamente cinco acreedores: el dueño de un bar, un carnicero, un droguero, un tendero y un sastre, todos los cuales desean recuperar su dinero, siendo el total de las deudas mucho mayor que el dinero disponible. Una solución sencilla sería aplicar la "*ley de equipartición*" y dar a cada uno 100 dólares. Pero la cosa se complica por el hecho de que cada uno de los acreedores quiere todo su dinero o nada. El dueño del bar desea sus 600 dólares, el carnicero y el droguero piden 300 cada uno, mientras que el tendero reclama 200 y el sastre 100. Como no hay bastante dinero para pagar todas las

deudas, el juez debe recurrir a lo que entre los juristas se llama "equidad", es decir, la solución de sentido común. Evidentemente no sería lógico dar los 600 dólares al dueño del bar y privar en absoluto de toda moneda a los demás acreedores. Una solución más razonable sería emplear más dinero para satisfacer a los acreedores con reclamaciones más pequeñas y rechazar las peticiones de los que piden demasiado. Así, por ejemplo, el sastre recibiría 100 dólares, el tendero 200, al carnicero o al droguero (a cara y cruz de una moneda) 300 dólares y nada al dueño del bar. (Debe mencionarse que este principio para la distribución del dinero se aplica efectivamente por la Fundación Nacional de Ciencia que tiene muy poco dinero y trata de distribuirlo razonablemente entre los distintos contratistas). Es dudoso que la equidad proporcione una única solución para problemas de esta clase, pero la física estadística si la proporciona. Desde que fue introducida la hipótesis de Planck relativa al mínimo de energía en los cuanta de luz de diferentes longitudes de onda, comenzaron a funcionar las leyes exactas de la estadística matemática, privando a muchas de las vibraciones de onda corta de toda energía por virtud de sus irrazonables elevadas reclamaciones.

Como resultado, se obtiene una fórmula para la distribución de la energía en la radiación térmica en la cual la mayor parte de la energía se da a la longitud media de onda mientras que las vibraciones de onda corta, que reclaman mucha, reciben muy poca o nada.

La fórmula deducida por Planck sobre la base de su hipótesis de los cuanta de luz resultó estar en perfecto acuerdo con todas las leyes conocidas de la radiación térmica. Pero la introducción de la idea de paquetes individuales de energía en la concepción clásica de la propagación ondulatoria de la luz ha producido una revolución de ideas únicamente comparable a la que resultó del experimento Michelson-Morley.

7. La realidad de los cuanta de luz

Mientras la noción primitiva de Planck de los paquetes de energía era bastante vaga y únicamente servía como base para la distribución estadística de la energía entre ondas de diferente longitud en el espectro, cobró una forma más definida cinco años más tarde por obra de Albert Einstein. En uno de sus tres artículos publicados en

1905[25], Einstein aplicó la idea de los cuanta de luz a la explicación del llamado "*efecto fotoeléctrico*". Era sabido desde hacía tiempo que la luz (en particular la luz ultravioleta), cuando incide sobre superficies metálicas, les comunica una carga eléctrica positiva. Después del descubrimiento de los electrones, se comprobó que este efecto es debido a la expulsión de los electrones procedentes de las superficies iluminadas.

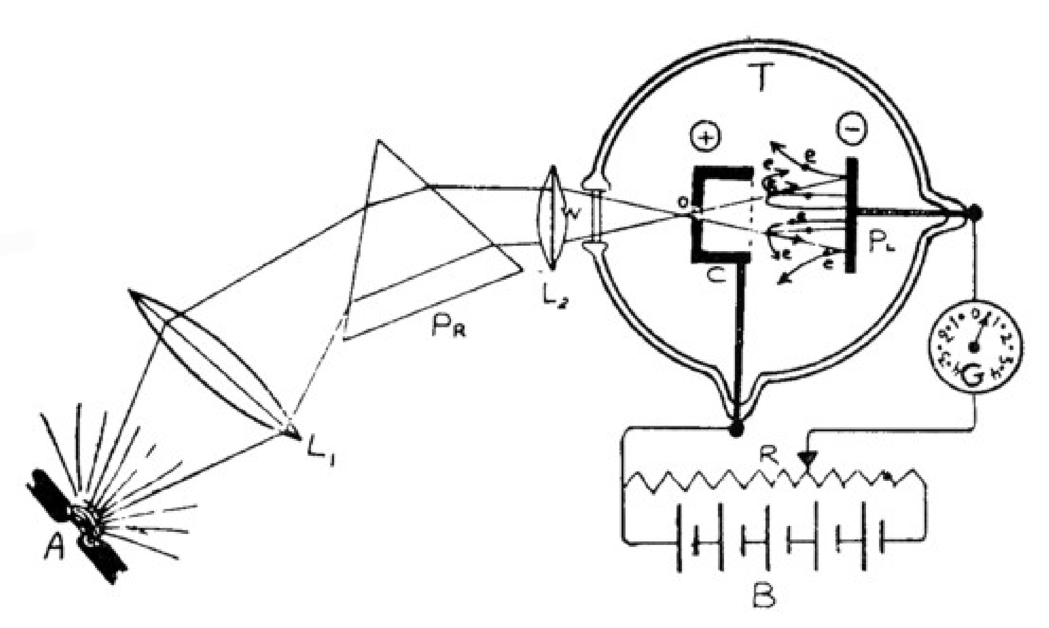


Figura 40. Aparato para el estudio del efecto fotoeléctrico. Los fotoelectrones proyectados por la lámina Pl hacia el cilindro C son detenidos por el campo eléctrico si la diferencia de potencial entre Pl y C es bastante grande.

Un dispositivo tipo para el estudio del efecto fotoeléctrico aparece en la Figura 40. La luz de un arco voltaico (que contiene gran cantidad de rayos ultravioleta) pasa a través de un sistema de dos lentes de cuarzo y de un prisma ("*monocromotor*") que separa las diferentes longitudes de onda. El rayo seleccionado (que puede cambiar por la rotación del prisma) entra a través de una ventana de cuarzo W en un tubo de vacío T, pasa a través de un agujero al fondo de un cilindro de cobre C y cae sobre una placa de metal P_L que puede ser de diferentes materiales. Un potencial eléctrico variable entre la placa y el cilindro retarda el movimiento de los

[25] Como ya queda dicho, los otros dos eran sobre el movimiento browniano y sobre la teoría de la relatividad

fotoelectrones emitidos. (La batería B y la resistencia variable R suministran la tensión eléctrica mientras el galvanómetro G mide la corriente.) Cuando el potencial eléctrico aplicado, multiplicado por la carga del electrón, es igual a su energía cinética, la corriente del circuito se detiene. Así, pues, variando la intensidad y la longitud de onda de la luz incidente y midiendo el potencial a que se detiene la corriente, se halla la relación entre la intensidad y la frecuencia de la luz y la velocidad de los fotoelectrones. De los estudios experimentales del efecto fotoeléctrico resultaron dos leyes:

1. *Para una cierta frecuencia de la luz incidente, la energía de los fotoelectrones emitidos no cambia, pero su número aumenta en proporción directa a la intensidad de la luz.*
2. *Cuando la frecuencia de la luz incidente cambia (aumenta) no son emitidos electrones hasta que se alcanza cierto umbral de frecuencia (que depende del metal). Para frecuencias más altas, la energía de los fotoelectrones aumenta en proporción directa a la diferencia de la frecuencia empleada y los umbrales de frecuencia.*

Estas dos leyes están representadas gráficamente en la Figura 41. Estas simplicísimas leyes no se adaptan en absoluto a las predicciones de la básica teoría electromagnética de la luz. Según esta teoría, el aumento de la intensidad de la luz significaría el aumento de la fuerza eléctrica oscilante de la onda. Al actuar sobre electrones cerca de la superficie del metal (estos son los electrones que transportan la corriente eléctrica a través de los cables metálicos), esta fuerza eléctrica más fuerte los expelería con mayor energía cinética. Pero el experimento demostró que, aunque se aumentase cien veces la intensidad de la luz, los fotoelectrones eran emitidos exactamente con la misma velocidad. Por otra parte, la curva en la Figura 41 muestra una relación muy definida entre la velocidad (o energía cinética) de los electrones y la frecuencia de la luz incidente, una relación para la cual no hay ninguna razón en la teoría electromagnética clásica de la luz.

Aplicando la idea de los cuanta de luz que transportan una cantidad definida de energía proporcional a su frecuencia, se encuentra, sin embargo, la explicación de las dos leyes empíricas del modo más sencillo. Cuando un cuanto de una luz

incidente choca con la superficie del metal e interactúa con uno de los electrones, debe comunicar al electrón toda su energía, puesto que no puede haber energía menor que un cuanto.

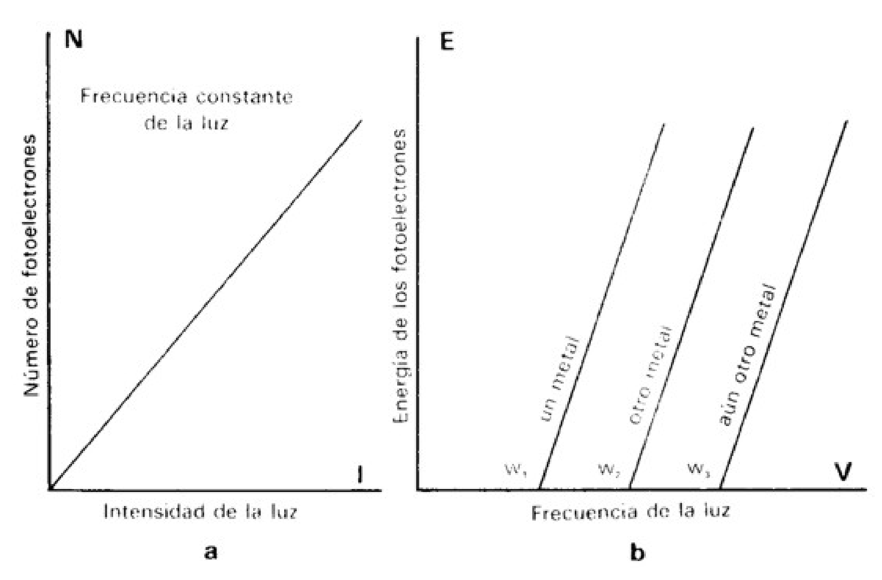


Figura 41. Leyes del efecto fotoeléctrico halladas experimentalmente. (a) La dependencia entre el número de fotoelectrones y la intensidad de la luz. (b) La dependencia entre la energía de los fotoelectrones y la frecuencia de la luz.

Cuanto mayor es la intensidad de la luz incidente, más son los cuanta de luz de la misma frecuencia y, por tanto, proporcionalmente, más electrones con la misma energía cinética. Cuando la frecuencia de la luz incidente aumenta, la situación es diferente. Cada cuanto de luz tiene entonces más energía, y comunicándola a un electrón lo expele del metal con mayor velocidad. Al pasar a través de la superficie del metal, el electrón pierde una cierta cantidad de la energía recibida del cuanto de luz; esta cantidad de energía depende de la naturaleza del metal y se la llama con el nombre (realmente inadecuado) de "*función de trabajo*". Así, pues, la energía del fotoelectrón está dada por una fórmula muy sencilla:

$$E = h\vartheta - W$$

en la que W es la función de trabajo del metal en cuestión. Cuando $h\vartheta < W$ (ó $E < 0$), los electrones no toman bastante energía del cuanto de luz para atravesar la

superficie y no ocurre nada. Pero en cuanto $h\vartheta$ se hace mayor que W, comienza la emisión de fotoelectrones cuya energía aumenta linealmente con ϑ. La escarpadura de la curva en la Figura 41 debe ser igual a la constante cuántica h y lo es. Así, pues, de un golpe, Einstein explicó las misteriosas leyes del efecto fotoeléctrico y dio un vigoroso apoyo a la idea original de Planck respecto a los paquetes de energía radiante.

Otro fuerte apoyo para la hipótesis de los cuanta de luz, que por aquel tiempo ya estaba mereciendo el nombre de teoría, se debe a los trabajos del físico americano Arthur Compton, tocador de guitarra hawaiana, campeón de tenis y gran investigador de la naturaleza de los rayos cósmicos. Estos últimos estudios le valieron la fama de ser el hombre brillante de todo México. Las circunstancias, según el propio Compton las describió el autor, fueron las siguientes:

> *Al estudiar los cambios de la intensidad de los rayos cósmicos desde el polo al ecuador, Compton había realizado mediciones de esta intensidad en algún lugar en la región meridional de México. El sitio para las mediciones había de ser lejos de las ciudades para evitar las perturbaciones causadas por las líneas de energía, el tráfico, etc., pero, por otra parte, debía ser un lugar con un suministro suficiente de corriente eléctrica. La solución fue un monasterio a cierta distancia de la ciudad de México, un lugar tranquilo, con su propia estación de energía y baterías de reserva y con un abad interesado en el progreso de la ciencia. Compton llegó a la estación de ferrocarril más próxima al monasterio con unas doce cajas llenas de instrumentos científicos; eran cajas de madera con las dimensiones de una caja de trajes de tamaño medio y agarraderas metálicas para transportarlas. Dos cajas contenían electrómetros Kohlrausch —esferas negras de metal con pequeñas ventanas a cuyo través se podía observar un filamento que registraba la carga eléctrica. Las demás cajas estaban cargadas de ladrillos de plomo empleados para protegerse de la radiación.*
>
> *Es sabido por todos los visitantes de México que a la llegada a la estación los viajeros son rodeados inmediatamente por una multitud de hombres y muchachos descalzos que gritan: "¿Llevo su equipaje, señor?", y le arrebatan la maleta de las manos. En este caso, Compton cogió las dos cajas que*

contenían los electrómetros e invitó a los mexicanos a hacerse cargo de las demás. Aquello fue una procesión: Un "americano distinguido" andando ligero por el andén, balanceando las dos cajas de instrumentos en sus manos, y una hilera de mexicanos, dos por caja, encorvados con su peso. Pero la aventura no termine) aquí. Cuando el camión cargado con Compton y sus cajas de instrumentos llegó a la puerta del monasterio fue detenido por dos soldados mexicanos, que querían inspeccionar el equipaje. La cuestión era que, en aquellas fechas, el Gobierno mexicano andaba a las grebas con la Iglesia católica y se habían puesto guardias en torno a todas las instituciones católicas. Al abrir las cajas, los soldados encontraron "cuatro bombas negras" y "una cantidad de plomo" que presumían podría ser usada para hacer balas. Compton fue detenido y tuvo que esperar varias horas en la comisaría de policía antes de que las Mamadas telefónicas a la Embajada de los Estados Unidos en la capital mexicana zanjasen la cuestión. La intensidad de los rayos cósmicos en el monasterio en cuestión resulté ser exactamente la que se esperaba.

Pero volvamos al efecto Compton. Como era un fanático de los experimentos, quiso visualizar las colisiones entre los cuanta de luz y los electrones semejantes a las que ocurren entre las bolas de marfil en una mesa de billar, excepto en el hecho de que, mientras todas las bolas de biliar son iguales (menos en el color), los cuanta de luz y los electrones deben ser considerados como bolas de masas diferentes. Razonaba que, a pesar del hecho de que los electrones que constituyen el sistema planetario de un átomo están ligados al núcleo central por las fuerzas de la atracción eléctrica, estos electrones se comportarían exactamente como si estuvieran completamente libres cuando el cuanto de luz que choca con ellos llevaba una cantidad suficientemente grande de energía. Supongamos una bola negra (electrón) quieta en una mesa de billar y sujeta por una cuerda a un clavo hincado en la superficie de la mesa y que un jugador, que no ve la cuerda, trata de empujarla a una tronera golpeándola con una bola blanca (cuanta de luz). Si el jugador envía su bola con una velocidad relativamente pequeña, la cuerda resistirá el impacto y no conseguirá su intento. Si la bola blanca se mueve algo más rápidamente, la cuerda puede

romperse, pero al hacerlo producirá una perturbación suficiente para que la bola negra siga una dirección completamente equivocada. Pero si la energía cinética de la bola blanca excede, por un factor grande, la fuerza de la cuerda que sostiene la bola negra, la presencia de la cuerda no influirá en nada prácticamente y el resultado de la colisión de las dos bolas será el mismo que si la bola negra estuviera completamente libre.

Compton sabía que la energía que sujeta a los electrones exteriores de un átomo es comparable a la energía de los cuanta de luz visible. Así, pues, para hacer extraordinariamente fuerte el impacto escogió para sus experimentos los cuanta ricos de energía de los rayos X de alta frecuencia. El resultado de una colisión entre los cuanta de los rayos X y los electrones libres (prácticamente) puede ser tratada de la misma manera que una colisión entre dos bolas de billar. En el caso de una colisión de frente, la bola quieta (electrón) será arrojada a elevada velocidad en la dirección del impacto, mientras que la bola incidente (cuanto de rayos X) perderá una considerable fracción de su energía. En el caso de un choque lateral, la bola incidente perderá menos energía y sufrirá una pequeña desviación de su trayectoria primitiva. En el caso de un simple roce, la bola incidente seguirá prácticamente sin desviación y perderá solamente una pequeña parte de su energía ordinaria. En el lenguaje de los cuanta de luz, este comportamiento significa que en el proceso de dispersión, los cuanta de rayos X desviados es grandes ángulos tendrán una cantidad más pequeña de energía y, por tanto, una mayor longitud de onda. Los experimentos realizados por Compton confirmaron con todo detalle los cálculos teóricos y así proporcionó un nuevo apoyo a la hipótesis de la naturaleza cuántica de la energía radiante.

8. El átomo de Bohr

En 1911 llegó a Manchester un joven (veinticinco años) físico danés llamado Niels Bohr, que durante sus estudios en la Universidad de Copenhague aplicó su experiencia de jugador bien conocido de fútbol al problema de la dispersión de las partículas alfa a través de una muchedumbre de átomos que tratan de atraparlas y detenerlas. Por aquellas fechas, Rutherford estaba realizando sus experimentos que abrirían una nueva era de la física y llevaron al descubrimiento del núcleo atómico.

Bohr gustaba de las ideas de Rutherford y éste dijo a un amigo: "*Este joven danés es el mozo más inteligente que hasta ahora he encontrado*". Así, se hicieron amigos y fueron compañeros de armas para siempre en adelante.

Es prácticamente imposible describir Niels Bohr a una persona que nunca trabajó con él. Probablemente su cualidad más característica era la lentitud de su pensamiento y comprensión. Cuando a fines de la segunda década del siglo y principio de la tercera el autor de este libro fue uno de los "muchachos de Bohr" que trabajaban en su Instituto de Copenhague con una beca de Carlsberg (la mejor cerveza del mundo), tuvo muchas ocasiones de observarle. Al atardecer, cuando un grupo de discípulos de Bohr "trabajaban" en el Instituto Paa Blegdamsvéjen discutiendo los últimos problemas de la teoría de los cuanta o jugando al ping-pong en la mesa de la biblioteca con tazas de café en ella para hacer más difícil el juego, aparecía Bohr diciendo estar muy cansado y que le gustaría "hacer algo". Hacer algo significaba indefectiblemente ir al cine, y las únicas películas que le gustaban eran las tituladas "*Lucha a tiros en el rancho Lazy Gee*" o "*El jinete solitario y una muchacha india*". Pero era penoso ir con Bohr al cine. No podía seguir el argumento y nos preguntaba constantemente, con gran enojo del resto del público, cosas como ésta: *"¿Es ésta la hermana del cowboy que mató de un tiro al indio que guiso robar un rebaño de ganado que pertenecía a su cuñado?"* La misma lentitud de reacción mostraba en las reuniones científicas. Muchas veces, un joven físico visitante (la mayoría de los físicos que visitaban Copenhague eran jóvenes) hablaba brillantemente de sus recientes cálculos sobre algún intrincado problema de la teoría de los cuanta. Todo el mundo, en el público, comprendía claramente el razonamiento, menos Bohr. Así, todo el mundo empezaba a explicarle el sencillo punto que había equivocado y en la baraúnda que se producía, todo el mundo terminaba por no comprender nada. Por último, después de mucho tiempo, Bohr comenzaba a comprender y resultaba que lo que él había comprendido sobre el problema presentado por el visitante era absolutamente distinto de lo que éste pensaba y esto era lo correcto, mientras que la interpretación del visitante estaba equivocada.

La afición de Bohr a las películas del Oeste se tradujo en una teoría desconocida para todos excepto para sus compañeros de cine en aquel tiempo. Todo el mundo

sabe que en todas las películas del Oeste (al menos en el estilo de Hollywood) el pillo siempre dispara en seguida, pero el héroe es más rápido y siempre mata al bribón. Niels Bohr atribuyó este fenómeno a la diferencia entre acciones deliberadas y acciones condicionadas. El bribón ha de decidir cuando ha de echar mano a la pistola, lo que retrasa su acción, mientras que el héroe actúa más rápidamente porque actúa sin pensar cuando ve al bribón coger la pistola. Todos discrepamos de la teoría y a la mañana siguiente el autor se fue a una tienda de juguetes para comprar un par de pistolas de cowboy. Nosotros disparábamos sobre Bohr, que hacía de héroe, pero él nos mató a todos.

Otro ejemplo de la lentitud de pensamiento de Bohr era su inhabilidad para encontrar una rápida solución a los crucigramas. Una tarde, el autor fue a la casa de campo de Bohr en Tisvileleje (al norte de Jutlandia), donde Bohr había estado trabajando todo el día con su ayudante, León Rosenfeld (de Bélgica) en un importante trabajo sobre las relaciones de incertidumbre (véase más adelante). Ambos, Bohr y Rosenfeld estaban completamente agotados por el trabajo del día y, después de cenar, Bohr indicó, para descanso, resolver un crucigrama de alguna revista inglesa. La cosa no marchó muy bien y una hora más tarde, Fru Bohr ("Fru" significa, en danés, "Señora") sugirió que debíamos irnos todos a dormir. Quién sabe a qué hora de la noche, Rosenfeld y yo, que compartíamos la habitación de invitados en el piso superior, fuimos despertados por unos golpes en la puerta. Saltamos de la cama preguntando: ¿Qué hay? ¿Qué ocurre?" Entonces oímos una voz apagada a través de la puerta: "*Soy yo, Bohr. No quiero perturbarles, pero quiero decirles que la ciudad industrial inglesa con siete letras, que termina en ich, es Ipswich*".

La expresión favorita era "*No quiero decir que... Pero...*", y muchas veces paseaba con una revista abierta en las manos diciendo: "*No quiero criticar, pero quisiera comprender cómo un hombre puede escribir tales absurdos*".

Otra anécdota sobre Niels Bohr antes de tratar su teoría del átomo. Una vez, ya tarde, por la noche (hacia las once por los relojes de Copenhague), el autor volvía con Bohr, Fru Bohr y un físico holandés, Cas Casimir, de una cena dada por uno de los miembros del Instituto de Bohr. Cas era un experto escalador de fachadas, y a menudo podía vérsele en la biblioteca del Instituto encaramado cerca del techo en

lo alto de los estantes de libros con un libro en la mano y las dos piernas estiradas a lo largo. Íbamos por una calle desierta y pasamos al lado del edificio de un Banco. La fachada del Banco, formada por grandes bloques de cemento, llamó la atención de Casimir y escaló dos pisos. Cuando bajó, Bohr guiso igualar la hazaña y ascendió lentamente por la fachada del Banco. Algo confusos, Fru Bohr, Casimir y yo, estábamos debajo observando la lenta ascensión de Bohr por la pared. En este momento, dos guardias de la ronda de noche se aproximaron rápidamente por detrás, dispuestos a la acción. Miraron a Bohr, que pendía entre el primero y segundo piso, y uno de ellos dijo: "*Oh, no es más que el profesor Bohr*", y ya completamente tranquilos, siguieron su camino.

Después de estas notas preliminares, entremos en la exposición de la teoría atómica de Bohr, publicada en 1913 y fundada en el descubrimiento de Rutherford de que los átomos tienen un núcleo dotado de masa y cargado positivamente con un enjambre de electrones que giran a su alrededor, a modo de un pequeño sistema planetario. La primera dificultad que Bohr encontró en esa concepción es que ese átomo no podía existir más que una insignificante fracción de segundo. Ciertamente, un electrón que gira en órbita en torno al núcleo es equivalente a un oscilador eléctrico y tiene que emitir ondas electromagnéticas, perdiendo rápidamente su energía. Es fácil calcular que, como consecuencia, los electrones atómicos se mueven en trayectorias espirales y terminan por caer en el núcleo en una cienmillonésima de segundo. Pero esto no ocurre así, puesto que los átomos son configuraciones completamente estables. La situación era tan paradójica como la de la catástrofe ultravioleta de Jeans y para Bohr fue evidente que la solución de la dificultad debía ser buscada siguiendo las mismas líneas.

Si la energía radiante puede existir únicamente en ciertas cantidades mínimas o múltiples de estas, ¿por qué no hacer la misma suposición respecto a la energía mecánica de los electrones que giran en torno al núcleo?

En este caso, el movimiento de los electrones en el estado normal de un átomo correspondería a estas cantidades mínimas de energía, mientras que los estados de excitación corresponderían a un número mayor de estos cuanta de energía mecánica. Así, pues, un mecanismo atómico se comportaría, en cierto modo, como

la caja de transmisión de un automóvil; se puede poner el auto en primera, segunda y tercera velocidad, pero no entre dos de ellas.

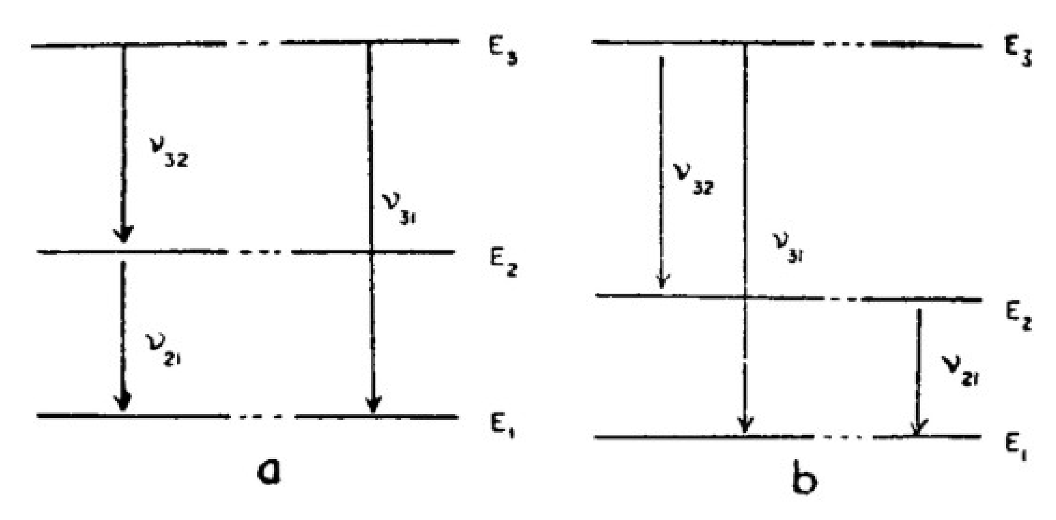


Figura 42. Ilustración del principio de Rydberg. (a) Si un electrón puede saltar del nivel de energía E_3 al nivel E_2 emitiendo la frecuencia v_{32} y saltar otra vez de E_2 a E_1 emitiendo la frecuencia v_{21}, entonces debe ser también posible una directa transición de E_3 a E_1 emitiendo la frecuencia v_{31} = v_{32} + v_{21}. (b) Si un electrón salta de E_3 a E_2 emitiendo la frecuencia v_{32} o a E_1 emitiendo la frecuencia v,.. también debe ser posible la transición de E_2 a E. con la frecuencia v_{21} = — v_{32}.

Si el movimiento de los electrones atómicos y la luz emitida están cuantificados, entonces la transición de un electrón desde un alto nivel cuántico a otro más abajo producirá la emisión de un cuanto de luz con hv igual a la diferencia de energía entre los dos niveles. Viceversa, si hv de un cuanto incidente de luz es igual a la diferencia de energía entre el estado normal y el estado de excitación en un átomo dado, el cuanto de luz será absorbido y el electrón se moverá del nivel más bajo al más alto. Este proceso de intercambio entre la materia y la radiación está representado esquemáticamente en la Figura 42 a, b, que lleva a una importante conclusión. Si un cuanto de luz con la energía hv_{32} puede ser emitido en la transición de un electrón del estado de energía E_3 al estado de energía E_2 y si la transición de E_2 a E_1 produce la emisión de un cuanto de luz con la energía hv_{21} entones debemos poder observar, al menos en algunos casos, un cuanto de luz con la energía $hv_{32} + hv_{21} = h(v_{32} + v_{21})$ correspondiente a una transición directa de E a E_3. Análogamente, la emisión de un cuanto de luz con las energías hv_{31} y hv_{32} nos

lleva a esperar la posibilidad de emisión de luz con el cuanto de luz $hv_{31} — hv_{32} = h (v_{31} — v_{32})$. Eliminando h podemos decir que si dos frecuencias de emisión son observadas en el espectro de un átomo dado, también podemos esperar sus sumas y diferencias. Pero esto es exactamente el llamado "principio de combinación de Rydberg", descubierto empíricamente por el espectrocopista alemán de ese nombre, mucho antes de que existiera la teoría cuántica.

Todos estos hechos no dejan duda de que el concepto fundamental de Bohr de la cuantificación de la energía mecánica era correcta y sólo faltaba encontrar cuáles eran las reglas de esa cuantificación. Para ello, Bohr tomó el caso del más sencillo de los átomos, el átomo de hidrógeno, que, conforme hemos dicho, consta de un solo electrón que gira alrededor del núcleo transportando una sola carga positiva, un protón como lo llamamos ahora. El espectro visible del hidrógeno tiene cuatro rayas —una roja, otra azul y dos violeta—, pero al estudiar la luz ultravioleta se descubrió un gran número de rayas con longitudes de onda más pequeñas. Estas secuencias de rayas, que están cada vez más apretadas y se aproximan a un límite definido en el lado de la alta frecuencia son conocidas en espectroscopía con el nombre de series, y la serie de hidrógeno es la más típica y regular de todas. En 1885, un profesor alemán J. J. Balmer descubrió que las rayas del espectro del hidrógeno (conocidas ahora como "serie Balmer") pueden ser expresadas por esta sencilla fórmula:

$$\vartheta = R\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2}\right)$$

en que R es una constante numérica y n toma los valores de 3, 4, 5, 6, etc. (evidentemente, n no puede ser 1 ó 2, puesto que en este caso v sería negativa o cero). Multiplicando la fórmula por h, para obtener la energía del cuanto de luz emitido a la izquierda, tenemos:

$$h\vartheta = R\vartheta\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2}\right)$$

que fue modificada por Bohr en esta forma:

$$h\vartheta = R\vartheta\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

conforme a un hecho muy conocido de la aritmética.

De esta primera exposición se sigue que $-Rh/n^2$ debe representar los niveles de energía del electrón en un átomo de hidrógeno, entre los cuales tienen lugar las transiciones que llevan a la emisión de las rayas de Balmer. Escribimos el signo menos frente a ambas cantidades a causa de que la energía orbital de los electrones en un átomo es negativa, lo que significa simplemente que su energía cinética es menor que su energía potencial en el campo eléctrico, de suerte que no pueden salir. ¿Qué clase de movimiento en torno al núcleo correspondería a estos valores de energía?

El modo más sencillo de responder a esta pregunta es recordar que la energía potencial de las fuerzas de Coulomb cambia en razón inversa de la distancia al centro. Como los términos en la fórmula de Balmer cambian como los cuadros inversos del número entero n, concluimos que los radios de las sucesivas órbitas cuánticas deben aumentar como n^2.

Para el caso de órbitas circulares, que Bohr estudió primero, los tamaños relativos se ven en la Figura 43. La transición del electrón a la segunda órbita desde las órbitas situadas más allá de ella corresponde a las rayas de las series de Balmer pero, ¿qué ocurre con otras posibilidades?

Las transiciones desde las órbitas números 2, 3, 4, etc. a la primera órbita deben formar una serie de rayas similares a la serie Balmer pero situadas en la parte del extremo ultravioleta del espectro. Por otra parte, las transiciones desde las órbitas más elevadas a la órbita 3 deben dar una serie en el extremo infrarrojo. Ambas series fueron descubiertas por los espectrocopistas Theodore Lyman y Friedrich Paschen, y su existencia ha sido un fuerte apoyo para la teoría del salto de los electrones de Bohr.

Sabiendo que los radios de las órbitas cuánticas (sobre el supuesto de que son círculos, aumentan con los números enteros Bohr pudo averiguar que la cantidad mecánica está "cuantificada", es decir, que aumenta en la misma cantidad de una órbita a otra.

Resulta ser el producto del momento mecánico del electrón por la longitud de su órbita, cantidad que en mecánica se llama "acción". Y el cambio de "acción" de una órbita cuántica a otra resultó ser exactamente igual a la constante cuántica h empleada por Planck en su teoría de la radiación térmica y por Einstein. en su explicación del efecto fotoeléctrico.

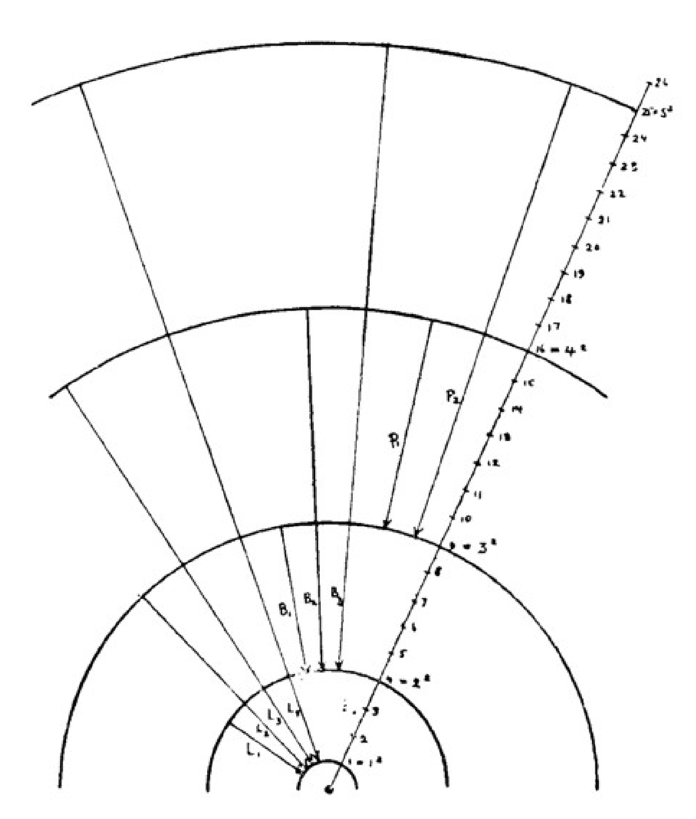


Figura 43. Las primeras cuatro órbitas circulares en el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno con sus radios aumentando como los cuadrados de los números enteros. Las transiciones L_1, L_2, L_3, L_4... a la órbita primera producen las líneas de la serie de Lyman. Las transiciones B_1, B_2, B_3... y P_1, P_2... a la segunda y tercera órbita producen las líneas de las series de Balmer y Paschen.

Muy pronto se vio claramente que el modelo primitivo de Bohr con órbitas cuánticas circulares y concéntricas debe ser generalizado por la adición de algunas elipses cuantificadas. Esta generalización fue realizada por el físico alemán Arnold Sommerfeld. La Figura 44 muestra una serie completa de las órbitas cuánticas posibles del electrón en un átomo de hidrógeno. La primera órbita circular (línea llena) permanece intacta. A la segunda línea circular (línea de trazos) Sommerfeld añadió tres órbitas elípticas, en que el electrón que se mueve en ellas tiene la

misma energía que en la órbita circular. A la tercera órbita circular añadió ocho órbitas elípticas (solamente tres aparecen en el esquema), todas ellas correspondientes a la misma energía que la de la órbita circular.

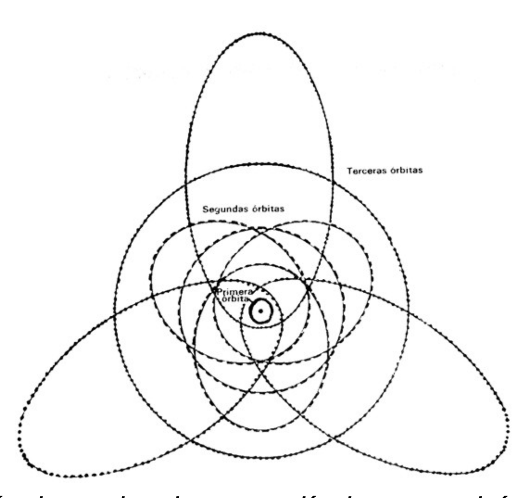


Figura 44. Orbitas cuánticas circulares y elípticas en el átomo de hidrógeno. La primera órbita circular (línea llena) corresponde a la menor energía del electrón. Las siguientes cuatro órbitas, una circular y tres elípticas (líneas de trazos) corresponden a la misma energía, mayor que en la primera órbita. Las siguientes nueve órbitas (líneas de puntos), de las cuales solo cuatro aparecer en la figura, corresponden a una energía aún mayor (la misma para las nueve).

Y, después de estas hay más y más órbitas elípticas añadidas a las órbitas circulares de orden más alto. La situación iba haciéndose cada vez más complicada, pero lo notable es que se adecuaba cada vez más estrechamente a los hechos observados. El átomo ya no era análogo a un sistema planetario en que Júpiter podría saltar repentinamente a la órbita de Venus, sino que era descrito por un dibujo abstracto relacionado tan sólo lejanamente con los círculos y elipses de la mecánica clásica.

Durante la primera década de su desarrollo, la teoría de Bohr registró grandes éxitos al explicar las propiedades de los átomos complejos, sus espectros ópticos, las interacciones químicas, etc. A pesar de todos esos éxitos, la teoría conservaba su original naturaleza esquelética, y todos los esfuerzos para describir en concreto las transiciones de los electrones de un estado de energía a otro y calcular las intensidades de las rayas espectrales emitidas como resultado de estas transiciones, no llevaron a nada.

9. El modelo atómico de Bohr y el sistema periódico de los elementos

Después de exponer el movimiento del único electrón en un átomo de hidrógeno, veamos ahora la cuestión de lo que ocurre en el caso de los átomos que contienen 2, 3, 4 y muchos más electrones. Para el núcleo que contiene una carga eléctrica mayor, el diseño general de las órbitas cuánticas sigue siendo el mismo que en el caso de los átomos de hidrógeno, excepto que, por virtud de la mayor fuerza de atracción ejercida por el núcleo, los diámetros de todas las órbitas disminuyen cada vez conforme los elementos tienen números atómicos cada vez más elevados.

¿Cuál es el mayor número de electrones en los átomos de los elementos pesados que giran en estas órbitas cuánticas contraídas? En términos de la física clásica, la respuesta a esta pregunta es casi trivial. El más estable de cualquier sistema mecánico es aquel en que el sistema no puede perder más energía para descender a un nivel más bajo. Así pues, todos los átomos adicionales en los átomos pesados se puede esperar que desciendan a la primera órbita cuántica y se muevan en círculo en torno al núcleo. Y como sabemos que el diámetro de estas órbitas es más pequeño en los elementos más pesados, podemos predecir que estarán cada vez más apretadamente colmados de electrones. Pero el hecho es que no ocurre así: cualquiera que sea la carga del núcleo el tamaño de los átomos es aproximadamente el mismo.

El problema interesó la atención del físico alemán Wolfgang Pauli, cuya corpulencia y jovial figura era familiar y muy agradable de ver en el Instituto Bohr de Física Teórica. Pauli era un físico teórico de primera clase y entre sus amigos su nombre será asociado siempre con el misterioso fenómeno llamado "efecto Pauli". Es sabido que todos los físicos teóricos son muy torpes en el manejo de los instrumentos experimentales y con mucha frecuencia rompen aparatos caros y complicados con solo tocarlos. Pauli era un físico teórico tan bueno que rompía cosas en cuanto andaba por un laboratorio. El caso más convincente del "efecto Pauli" ocurrió un día en que el instrumental del profesor James Frank, en el Instituto de Física de la Universidad de Göttingen hizo explosión y quedó destrozado sin razón aparente. Las investigaciones posteriores mostraron que la catástrofe se produjo exactamente a la misma hora en que un tren donde viajaba Pauli, de Zurich a Copenhague, se detuvo cinco minutos en la estación de Göttingen.

Reflexionando sobre el movimiento de los electrones dentro de un átomo, Pauli formuló su principio ahora famoso (que él mismo llamó "principio de exclusión") según el cual cada órbita cuántica no puede tener más de dos electrones. El principio exige que si estos dos puestos están cubiertos, los electrones siguientes deben alojarse en otra órbita. Cuando todas las órbitas en una cierta capa están ya cubiertas, las órbitas de la capa siguiente (correspondientes a un nivel más alto de energía) comienzan a llenarse.

Conforme avanzamos en la serie natural de los elementos hacia los átomos cada vez más pesados, el radio de las órbitas cuánticas disminuye a causa de la carga creciente del núcleo, pero, por otra parte, cada vez más órbitas son ocupadas por electrones. Así ocurre que el tamaño de los átomos sigue siendo, por término medio, el mismo desde los elementos más ligeros a los más pesados. Hay, sin embargo, pequeñas variaciones de tamaño atómico cuando avanzamos de una capa ya completa a otra (configuraciones de los gases nobles). Esto origina pequeños cambios periódicos de densidad de varios elementos que son paralelos a los cambios periódicos en sus propiedades.

Las capas de electrones de todas las especies de átomos en la tabla periódica son cubiertas de acuerdo con la jerarquía fija de sus estados de energía. La primera capa, que representa el estado más bajo de energía disponible, es la que se llena primero. En el átomo de helio, esta capa está completamente llena con dos electrones que se persiguen siguiendo la primera órbita cuántica. El elemento siguiente, litio, tiene 3 electrones, uno de los cuales, conforme al principio de exclusión, debe pasar a la segunda capa que consiste en una órbita circular y tres órbitas elípticas. Como estas cuatro órbitas pueden tener un total de 8 electrones y la órbita interior 2, la primera y la segunda capa tienen que estar llenas en el átomo de Neón que tiene 10 electrones. Los electrones adicionales en elementos aún más pesados deben ser añadidos a una tercera serie de órbitas circulares y elípticas y así sucesivamente. Así pues, el principio de exclusión de Pauli explica la estructura interna de los elementos por la manera como van llenándose sus capas consecutivas de electrones. El principio también explica la identidad externa, o química, de un átomo y la periodicidad de las propiedades químicas en la serie de las clases de átomos en la tabla de los elementos. Estas características dependen

del número de electrones en las capas exteriores de los átomos, que se ponen en contacto cuando los átomos chocan entre sí.

Cuando el principio de Pauli fue formulado por primera vez se creía que los electrones no eran más que cargas puntiformes de electricidad negativa, pero pronto se descubrió que los electrones deben ser considerados también como pequeños magnetos, porque poseen un momento magnético a causa de que giran rápidamente sobre sí mismos cuando circulan en torno al núcleo. Una vez que sabemos considerar a los electrones como pequeños magnetos, hemos de tener en cuenta tanto las fuerzas eléctricas que son las principales responsables de su movimiento orbital como las fuerzas magnéticas producidas por su giro sobre sí mismos.

Un electrón tiende a girar en una de estas dos maneras: bien en la dirección en que se mueve en su órbita, bien en la dirección contraria. Se ha demostrado que los electrones que recorren la misma órbita deben girar en direcciones opuestas. Este descubrimiento obliga a formular el principio de Pauli en forma algo diferente. A causa de que los electrones al girar sobre sí mismos en direcciones opuestas producen débiles campos magnéticos que alteran ligeramente cada uno la órbita del otro, podemos decir ahora que los dos electrones que originariamente podían recorrer la misma órbita en realidad siguen dos órbitas diferentes (aunque muy similares). Por tanto es más racional considerar las órbitas permitidas como pares cercanos separados por débiles interacciones magnéticas.

Esta concepción de la estructura en capas del átomo nos proporciona una sencilla explicación de la naturaleza de la valencia química de los diferentes elementos. Podemos demostrar, sobre la base de la teoría cuántica, que los átomos que tienen una capa casi completa tienen tendencia a tomar electrones suplementarios para terminar de llenar esa capa y que los átomos que han comenzado una nueva capa de electrones tienen tendencia a deshacerse de estos electrones suplementarios. Por ejemplo, el cloro (número atómico 17) tiene 2 electrones en la primera capa, 8 en la segunda y 7 en la tercera y, por tanto, a la capa exterior le falta un electrón. Por otra parte, un átomo de sodio (número atómico 11) tiene 2 electrones en la primera capa, 8 en la segunda y sólo 1 como comienzo de la tercera capa. En estas circunstancias cuando un átomo de cloro encuentra un átomo de sodio, "adopta" al

solitario electrón de éste y se convierte en Cl^-, mientras el átomo de sodio se convierte en Na^+. Los dos iones son ahora mantenidos juntos por las fuerzas electrostáticas y forman una molécula estable de sal de mesa. Del mismo modo, un átomo de oxigeno al que le faltan dos electrones en su capa exterior (número atómico = 8 = 2 + 6) tiende a adoptar dos electrones de cualquier otro átomo y puede así enlazar dos átomos monovalentes (H, Na, K, etc.) a un átomo bivalente como el del magnesio (número atómico = 12 = 2 + 8 + 2) que tiene dos electrones que puede prestar. También se explica claramente que los gases nobles que tienen todas sus capas completas y carecen de átomos para tomar o dar sean químicamente inertes.

10. Las ondas de materia

En el año 1924, un joven aristócrata francés, el marqués Louis de Broglie, que comenzó su carrera científica como estudiante de historia medieval y sólo después se interesó por la física teórica, presentó a la Facultad de la Universidad de Paris una tesis doctoral llena de ideas insólitas. De Broglie creía que el movimiento de las partículas materiales va acompañado y guiado por ciertas ondas piloto que se propagan en el espacio en compañía de las partículas. Si es así, entonces las órbitas cuánticas seleccionadas en el modelo atómico de Bohr pueden ser interpretadas como las órbitas que satisfacen la condición de que su longitud contiene un número estero de estas ondas piloto, una onda en la primera órbita cuántica, dos en la segunda, etc. Hemos visto antes que, para el caso sencillo del movimiento circular, la órbita cuántica de Bohr satisface la condición de que sus longitudes multiplicadas por la cantidad de movimiento (masa por velocidad) del electrón que se mueve es igual a h para la primera órbita, 2h para la segunda, 3h para la tercera, etc. Estas dos afirmaciones resultara idénticas si suponemos que la longitud de la onda piloto es igual a h dividida por la cantidad de movimiento de la partícula:

$$h/mv$$

que es precisamente lo que Louis de Broglie suponía. Para las órbitas de radios intermedios, una onda piloto corriendo en círculo no "*puede cogerse la cola*" y, en

consecuencia, no puede existir este tipo de movimiento. Así, con una audaz idea, De Broglie cambió las órbitas esqueléticas de Bohr en una carnosa noción de tubos de órgano, membranas de tambor, etc. La mecánica de las partículas adquirió propiedades semejantes a las ondas sonoras o luminosas.

Esta tesis revolucionaría puede ser sometida a una prueba experimental. Si los electrones son guiados por las ondas de De Broglie en su movimiento dentro del átomo, deben mostrar también algunas propiedades de ondas cuando se mueven en líneas rectas a través del espacio. Para los haces de electrones de unos cuantos kilovatios empleados en los laboratorios, la longitud de las ondas De Broglie se calculaba sería alrededor de 10^{-8} cm, comparable a la de los rayos X, de modo que se podía emplear la técnica de difracción de los rayos X para comprobar si hay ondas que acompañan al electrón no.

Un experimento en esta dirección fue realizado en 1927 por el hijo de Sir J. J. Thomson, George (después Sir George) y los físicos americanos C. J. Davisson y L. H. Germer, que dirigieron contra un cristal un haz de electrones acelerados en un campo eléctrico. El resultado fue una imagen que mostraba sin género de duda que se trataba del fenómeno ondulatorio de difracción. La longitud de onda calculada por los diámetros de los anillos de difracción coincide exactamente con la longitud de onda dada por la fórmula de Broglie h/mv. Y también aumentaba y decrecía cuando los electrones del haz eran acelerados o retardados. Unos años después, un físico alemán, Otto Stern, repitió los experimentos de Davisson y Germer empleando en vez de electrones un haz de átomos de sodio y encontró que el fenómeno de difracción descrito por la fórmula de De Broglie también se producía en este caso. Así, pues, resultó comprobado que las partículas pequeñas, tales como electrones o átomos, son guiadas en su movimiento por "ondas piloto", cuya naturaleza era completamente oscura en aquel tiempo.

Las ideas de De Broglie fueron generalizadas y puestas sobre bases estrictamente matemáticas en 1926 por el físico austríaco Erwin Schrödinger, que las incorporó en la famosa ecuación de Schrödinger, aplicable al movimiento de las partículas en cualquier campo de fuerzas. El empleo de la ecuación de Schrödinger en el caso del hidrógeno, lo mismo que en caso de átomos más complejos, reproduce los resultados de la teoría de las órbitas cuánticas de Bohr y, además, trata cuestiones

(tales como las intensidades de las rayas espectrales) que la vieja teoría no podía comprender. En lugar de órbitas cuánticas circulares elípticas, el interior de un átomo fue entonces descrito por las llamadas funciones Ψ correspondientes a varios tipos de las ondas de De Broglie que pueden existir en el espacio que rodea los núcleos atómicos.

Al mismo tiempo que el primer artículo de Schrödinger, que fue publicado en la revista alemana *Annales der Physick*, apareció en otra revista, Zeitschrift der Physik, un trabajo sobre la teoría cuántica escrito por el joven físico alemán (24 años entonces) Werner Heisenberg. Es difícil exponer la teoría de Heisenberg con alguna medida de popularización. La idea principal es que las cantidades mecánicas, como posición, velocidad, fuerza, etc., no deben ser representadas por números ordinarios como 5 ó 7½ ó 13 5/7, sino por estructuras matemáticas abstractas llamadas "matrices", cada una de las cuales es semejante a la disposición de un crucigrama de números ordinarios seguidos por una serie infinita de líneas y columnas. Se pueden establecer reglas para la suma, resta, multiplicación y división de estas matrices, reglas que son completamente análogas a las del álgebra corriente, pero con una importante excepción. En el álgebra de matrices, el producto de A por B no es forzosamente igual al producto de B por A, el cual es el resultado de una complejidad mayor en el procedimiento de la multiplicación de matrices. La analogía más próxima es la del lenguaje humano, en el cual Douglas Malcolm no es lo mismo que Malcolm Douglas y un grande hombre no es lo mismo que un hombre grande. Pues bien, Heisenberg demostró que, si se considera que todas las cantidades en las ecuaciones de la mecánica clásica deben ser matrices, y además se introduce la condición suplementaria de qué cantidad de movimiento por velocidad menos velocidad por cantidad de movimiento = hi, en que h es la constante cuántica e i= $\sqrt{}$-1. es nuestra vieja amiga la unidad imaginaria, se obtiene una teoría que describe correctamente todos los fenómenos cuánticos conocidos.

La aparición simultánea de dos artículos que llegaban exactamente a los mismos resultados empleando métodos completamente distintos suscitó la consternación en el mundo de los físicos, pero pronto se vio que las dos teorías son idénticas matemáticamente. En efecto, las matrices de Heisenberg representan las soluciones tabuladas de la ecuación de Schrödinger y para resolver los distintos problemas de

la teoría cuántica se pueden usar intermitentemente la mecánica ondulatoria o la mecánica de matrices.

11. Relaciones de incertidumbre

¿Cuál es la significación de las ondas de De Broglie que guían a las partículas materiales en su movimiento? ¿Son ondas reales como las ondas de la luz o simplemente ficciones matemáticas introducidas por conveniencia para describir los fenómenos físicos del microcosmos? Esta cuestión fue contestada dos años después de la formulación de la mecánica ondulatoria de Heisenberg que se preguntó cómo las leyes cuánticas que introducen las cantidades mínimas de energía radiante y energía mecánica afectan las nociones básicas de la mecánica clásica.

Heisenberg fue directo a la raíz de la dificultad: el intento de aplicar las normas y métodos ordinarios de observación a fenómenos que se realizan en la escala atómica. En el mundo de la experiencia cotidiana podemos observar cualquier fenómeno y medir sus propiedades sin influir sobre el fenómeno en cuestión en algún grado significativo. Si intentamos medir la temperatura del café de una taza con un termómetro de baño, este instrumento absorberá demasiado calor del café que modificará considerablemente su temperatura. Pero con un pequeño termómetro clínico podemos obtener una lectura suficientemente exacta. Podemos medir la temperatura de un objeto tan pequeño como una célula viva mediante un par termoeléctrico en miniatura que tiene una capacidad calorífica casi insignificante. Pero en el mundo atómico no podemos pasar por alto la perturbación producida por la introducción de los aparatos de medición. Las energías en esta escala son tan pequeñas que aun la medición realizada más cuidadosamente puede traducirse en perturbaciones sustanciales del fenómeno observado y no podemos garantizar que los resultados de la medición describan efectivamente lo que habría ocurrido en ausencia de los aparatos de medida. El observador y sus instrumentos se convierten en parte integral del fenómeno que se investiga. Aun en principio no hay nada que sea un fenómeno físico en sí. En todos los casos hay una interacción completamente inevitable entre el observador y el fenómeno.

Heisenberg ilustró estas ideas por un minucioso estudio del problema de seguir el movimiento de una partícula material. En el macrocosmos podemos seguir la

trayectoria de una pelota de ping-pong sin afectar esa trayectoria en nada. Sabemos que la luz ejerce una presión sobre la pelota, pero no por eso vamos a jugar al ping-pong en un cuarto oscuro (suponiendo que fuera posible), puesto que la presión de la luz es demasiado pequeña para afectar la trayectoria de la pelota. Pero reemplacemos la pelota por un electrón y la situación resulta completamente distinta. Heisenberg examinó la situación valiéndose de un "experimento mental", un método de razonamiento empleado por Einstein en su exposición de la teoría de la relatividad.

En este ejercicio mental, el experimento está en un "taller ideal" que puede hacer toda clase de instrumentos o aparatos a condición de que su estructura y funcionamiento no contradigan las leyes fundamentales de la física. Por ejemplo, puede hacer un cohete que se mueva casi con la velocidad de la luz pero no más, o puede emplear una fuente de luz que emita precisamente un solo fotón, pero no medio fotón. Heisenberg se equipó con un montaje ideal para observar la trayectoria de un electrón. Imaginó un cañón electrónico que podía disparar un solo electrón horizontalmente en una cámara completamente vacía, incluso de una sola molécula de aire. Su luz provenía de una fuente ideal que podía emitir electrones de cualquier longitud de onda deseada y en el número deseado. Podía observar el movimiento del electrón en la cámara a través de un microscopio ideal que podía ser sintonizado a voluntad a lo largo de todo el espectro, desde las ondas de radio más largo hasta los más cortos rayos gamma.

¿Qué ocurriría si un electrón fuera disparado en la cámara? Según los textos clásicos de mecánica, la partícula seguiría una trayectoria conocida como parábola. Pero de hecho, en el momento en que un fotón choca contra él, el electrón retrocederá y cambiará su velocidad. Observando la partícula en puntos sucesivos de su movimiento, veremos que sigue un curso en zigzag a causa de los impactos del fotón. Pero como tenemos un instrumento idealmente flexible, aminoramos los impactos reduciendo la energía de los fotones, lo que se puede hacer empleando luz de menor frecuencia. De hecho, llegando al límite de la frecuencia infinitamente baja (lo que es posible en nuestro aparato) podemos hacer la perturbación del movimiento del electrón tan pequeña como deseamos. Pero entonces surge una nueva dificultad. Cuanta más larga la onda de luz menos seremos capaces de

determinar el objeto a causa del efecto de difracción. Así, pues, no podemos encontrar la posición exacta del electrón en un instante dado. Heisenberg demostró que el producto de las incertidumbres sobre posición y velocidad nunca puede ser menor que la constante de Planck dividida por la masa de la partícula:

$$\Delta v \cdot \Delta x \geqslant h/m$$

Así, con ondas verdaderamente cortas podemos definir las posiciones de una partícula en movimiento, pero interferimos en gran medida su velocidad, mientras que con ondas muy largas podemos determinar su velocidad *no perturbada* pero estaremos muy inciertos acerca de sus posiciones. Ahora bien, podemos escoger un camino medio entre estas incertidumbres. Si empleamos una longitud intermedia de onda luminosa perturbaremos la trayectoria de la partícula nada más que moderadamente y todavía podremos determinar su trayectoria con bastante aproximación. La trayectoria observada, expresada en términos clásicos, no será una línea afilada, sino más bien una banda borrosa, difuminada en los limites. Describir la trayectoria de un electrón de esta manera no presenta ninguna dificultad en un caso como una imagen de la televisión, donde el "espesor" de la trayectoria del electrón a la pantalla es mucho menor que el diámetro del punto formado en la pantalla por el haz de electrones. En este caso, podemos representar la trayectoria del electrón satisfactoriamente por una línea. Pero no podemos describir la órbita de un electrón dentro de un átomo en los mismos términos. ¡La banda de incertidumbre es tan ancha como la distancia de la órbita desde el núcleo!

Supongamos que dejamos el intento de seguir la pista de una partícula en movimiento mediante la luz y ensayamos en su lugar el método de la cámara de niebla. En nuestro taller hipotético construimos una cámara de niebla ideal completamente vaciada de toda partícula material, pero llena de pequeñísimos "indicadores" imaginarios que se ponen en actividad cuando un electrón pasa por sus proximidades. Los indicadores activados mostrarían la ruta de la partícula lo mismo que lo hacen las gotitas de agua en la cámara real de niebla[26].

---

[26] La cámara de niebla, usada por los físicos nucleares, será descrita en el capítulo siguiente.

La mecánica clásica diría que, en principio, los indicadores podían ser lo bastante pequeños y bastante susceptibles de responder de modo que no sustraerían ninguna cantidad significativa de energía a la partícula en movimiento y podríamos observar su trayectoria con toda la precisión deseada. Pero la mecánica cuántica tiene una objeción fundamental contra este procedimiento. Una de sus leyes es que cuanto más pequeño sea el sistema mecánico, tanto mayor es su cuanto de energía (la mínima cantidad) de energía. Así, cuando se reduciría el tamaño de los "indicadores" (para una medición más precisa de la posición del electrón), estos tomarían más energía de la partícula transeúnte. La situación es absolutamente análoga a la fatal dificultad de tratar de seguir la pista de una partícula por medio de la luz y llegamos de nuevo a la misma relación para las incertidumbres en la posición y la velocidad.
¿Dónde nos deja todo esto? Heisenberg concluyó que es el nivel atómico debemos renunciar a la idea de que la trayectoria de un objeto es una línea matemática (es decir, infinitamente delgada). Este concepto es bastante exacto cuando tratamos con los fenómenos en el reino de la experiencia corriente donde podemos pensar que un objeto se mueve manteniendo en su ruta por una especie de vía de ferrocarril. Pero en el diminuto mundo de los electrones de un átomo, los movimientos y sucesos individuales no están tan firmemente predeterminados. Las pequeñas partículas materiales, tales como electrones y protones, se mueven sobre un margen guiados por las ondas que deben ser consideradas exactamente como las trayectorias de ancha línea de la mecánica clásica. La cuestión importante es que la guía se realiza en una manera estocástica más bien que rigurosamente determinista. Únicamente podemos calcular la probabilidad de que un electrón choque contra un punto dado de una pantalla o que otra partícula material puede ser encontrada en un determinado lugar de un instrumento dado, pero no podemos decir con seguridad qué camino seguirá en un dado campo de fuerzas.
Debemos aclarar que la palabra "probabilidad" se usa aquí en un sentido bastante diferente de como se suele comprender en la física clásica y la vida diaria. Cuando decimos en una partida de póker que hay cierta probabilidad de hacer un póker de reyes queremos decir tan sólo que calculamos los albures a causa de que no conocemos la disposición de las cartas en el paquete de la baraja. Si conociéramos

exactamente cómo las cartas están dispuestas podríamos predecir con seguridad si haríamos o no un póker de reyes. La física clásica supone que lo mismo rige para un problema tal como el comportamiento de las moléculas de gas; su comportamiento ha sido descrito sobre la base de la probabilidad estadística únicamente a causa del conocimiento incompleto; si nos dieran las posiciones y velocidades de todas las partículas podríamos predecir con todo detalle los sucesos dentro del gas. El principio de incertidumbre quita la tierra por debajo de esa idea. No podemos predecir los movimientos de las partículas individuales porque no conocemos nunca exactamente las condiciones esenciales en el primer lugar que ocupan. Es imposible, es principio, obtener una medición exacta de ambas cosas, la posición y la velocidad, de una partícula en la escala atómica.

¿Es la función de onda Ψ (o, más bien, su cuadrado), que guía la trayectoria de una partícula material, una definida "entidad física" que existe en el mismo sentido que existen los átomos de sodio o un proyectil cohete intercontinental? La respuesta depende de lo que se quiere decir con la palabra "existencia". Las funciones de onda existen en el mismo sentido que las trayectorias de los cuerpos materiales. Las órbitas de la Tierra o de la Luna en torno a la Tierra existen en el sentido matemático de que representan el continuo de puntos ocupados consecutivamente por un cuerpo material en movimiento. Pero no existen en el mismo sentido que la vía férrea que guía el movimiento de un tren. En particular, la función de onda no tiene masa, no siendo más que una trayectoria difuminada.

Probablemente la analogía más próxima en el campo de la física clásica está dada por la noción de entropía. La entropía es una función matemática, inventada por los físicos teóricos y enlazada con la probabilidad matemática de un cierto tipo de movimiento molecular que determina la dirección en que se realizan habitualmente los procesos termonucleares, desde los pequeños valores de entropía a los más grandes. Pero la entropía no es una "entidad física" en el mismo sentido que masa o energía y mientras nosotros hablamos de un gramo de masa o (desde Einstein) de un gramo de energía, no podemos hablar en el mismo sentido de un gramo de entropía. Es tan absurdo como hablar de un gramo de ondas de De Broglie o un gramo de la función de Schrödinger.

Una mirada a la fórmula de Heisenberg muestra que cuando tratamos con materia en la escala macroscópica podemos dejar a un lado el principio de incertidumbre y confiar con toda seguridad en el viejo y buen principio del determinismo. El producto de la incertidumbre sobre la posición por la incertidumbre sobre la velocidad es igual a la constante h de Planck dividida por la masa de la partícula. La constante de Planck es una cantidad sumamente pequeña; su valor numérico monta aproximadamente solo a 10^{-27} en unidades centímetro-gramo-segundo. Cuando consideramos una partícula que pesa tanto como 1 mg, podemos en principio determinar simultáneamente su posición con una aproximación de una trillonésima de centímetro por segundo, o sea ¡30μ, por centuria!

El principio de Heisenberg fue desarrollado por Bohr en una nueva filosofía de la física. Reclama un cambio profundo en nuestras ideas sobre el mundo material, ideas que adquirimos en la experiencia ordinaria desde la infancia. Pero permite dar sentido a muchos rompecabezas de la física atómica.

Muchos aceptaron rápidamente las nuevas ideas. Otros las repudiaron por completo. A este último grupo perteneció Albert Einstein. Su convicción filosófica sobre el determinismo no le permitía elevar la incertidumbre a un principio. Y lo mismo que los escépticos estaban tratando de encontrar contradicciones en su teoría de la relatividad, Einstein intentó descubrir contradicciones en el principio de incertidumbre de la física cuántica. Sin embargo, sus esfuerzos no llevaron más que a robustecer el principio de incertidumbre. Es interesante ilustrar esto por un incidente que ocurrió en el Sexto Congreso Internacional Solvay de Física en Bruselas el año 1930.

En una discusión, en que Bohr estaba presente, Einstein realizó un "*experimento mental*". Arguyendo que el tiempo era una cuarta coordenada del espacio-tiempo y que la energía era un cuarto componente de la cantidad de movimiento (masa por velocidad), dijo que la ecuación de incertidumbre de Heisenberg implicaba que la incertidumbre en el tiempo está relacionada con la incertidumbre en la energía, siendo el producto de ambas igual, al menos, a la constante h de Planck. Einstein se levantó a demostrar que no era así, sino que el tiempo y la energía podían ser determinados sin ninguna incertidumbre. Imaginemos —dijo— una caja ideal

forrada de espejos perfectos que pueden mantener indefinidamente la caliente energía radiante. Pesemos la caja. Entones en un cierto instante, algún tiempo después, un reloj, a modo de una bomba cronometrada, abrirá un obturador ideal para dejar en libertad alguna luz. Pesemos ahora la caja otra vez. El cambio de masa expresa la energía de luz emitida. De esta manera, dijo Einstein, se puede medir la energía emitida y el tiempo en que fue liberada con toda la precisión deseada, en contradicción con el principio de incertidumbre.

A la mañana siguiente, después de una noche sin dormir apenas, Bohr asestó un golpe mortal a la refutación de Einstein. Al efecto, presentó un contra-experimento mental con un aparato ideal propio (que, como discípulo de Bohr, el autor de este libro construyó después realmente en madera y metal para uso de Bohr en las conferencias sobre este tema). Bohr atacó la cuestión de pesar la caja de Einstein. Una balanza de muelle dotada de un indicador que señala el peso en una columna vertical puesta a su lado, dijo, es buena para el caso. Ahora bien, como la caja tiene que moverse verticalmente cuando cambia su peso, habrá una incertidumbre en su velocidad vertical y, por tanto, una incertidumbre en su altura sobre la mesa, dijo Bohr. Además, la incertidumbre de su elevación sobre la superficie de la Tierra se traducirá en una incertidumbre sobre el ritmo del reloj, puesto que según la teoría de la relatividad el ritmo depende de la posición del reloj en el campo gravitatorio. Bohr pudo demostrar que las incertidumbres del tiempo y del cambio en la masa de la caja obedecerían a la relación que Einstein había tratado de rechazar.

Einstein, atenazado por su propio razonamiento, tuvo que conceder que el concepto de Bohr-Heisenberg estaba libre de contradicciones internas, pero, muy al final de su vida, se negó a aceptar el principio de incertidumbre y expresó su esperanza de que algún día los físicos volverían al punto de vista determinista.

12. Agujeros en la nada

Paul Adrien Maurice Dirac recibió su grado de ingeniero eléctrico al principio de la segunda década del siglo XX y se encontró sin empleo. Incapaz de encontrar un puesto pidió una beca en la Universidad de Cambridge y fue aceptado. Menos de diez años después recibía el premio Nobel de Física por sus importantes contribuciones a la mecánica cuántica. Dirac era y aún es el tipo de científico de la

"torre de marfil" y mientras siempre le gustaba charlar con sus colegas sobre su viaje a Oriente u otros temas corrientes, prefería proseguir sus estudios por sí solo. Pero sus observaciones durante las reuniones científicas siempre eran agudas y a punto. Una vez, durante una conferencia de física teórica en Copenhague, Dirac escuchaba al físico japonés Y. Nishina, que cubría la pizarra con sus cálculos y, por último, llegó a una importante fórmula relativa a la dispersión de la radiación de onda corta por los electrones libres. Dirac llamó la atención de Nishina sobre el hecho de que en la fórmula que había deducido finalmente en la pizarra el tercer término entre paréntesis tenía un signo negativo mientras en el manuscrito original el término era positivo. "*Bien, replicó Nishina, es correcta como está en el manuscrito; seguramente al deducir la fórmula en la pizarra he equivocado algún signo en algún lugar.*" "*En los números impares de los lugares*", corrigió Dirac. En efecto, tres, cinco, siete, etc. errores en los signos habrían producido el mismo resultado.

Una vez, durante un período de preguntas después de una conferencia de Dirac en la Universidad de Toronto, un profesor canadiense entre el auditorio levantó su mano:

> *— Señor Dirac, dijo, no comprendo cómo usted puede deducir esa fórmula que está en el ángulo superior de la izquierda de la pizarra.*
>
> *— Eso —dijo Dirac— es una manifestación, no una pregunta. Venga la pregunta siguiente, por favor.*

Su habilidad para la rápida gimnástica mental se prueba por la insólita solución que dio a un problema embrollado que ocupaba las mentes de los matemáticos y físicos de la Universidad de Göttingen durante una de sus visitas a ella. El problema era escribir todos los números desde 1 a 100 usando todas las notaciones algebraicas disponibles: +, —, potencial, radicales, etc., pero ninguna otra cifra más que el 2. Así, por ejemplo,

1	puede ser escrito como	(2 x 2)/(2 x 2)
2	“	2/2 + 2/2
3	“	$2^2 - 2/2$

5	“	$2^2 + 2/2$
7	“	$2^2 + 2 + 2/2$
...	“	...

Cuando le presentaron este problema a Dirac, encontró rápidamente una solución general para escribir cualquier número empleando solamente tres doses. La solución es:

$$N = -log_2 log_2 \sqrt{\sqrt{\sqrt{\sqrt{2}}}}$$

en que el número de radicales es igual al número dado N. Para los que saben álgebra la prueba es evidente.

Pero entre todos sus importantes descubrimientos matemáticos, Dirac estaba especialmente orgulloso de uno que, sin embargo, no contribuyó en nada a su fama. Charlando con la mujer de un miembro de la Facultad estuvo observando cómo tejía una bufanda o algo semejante. Al volver a su estudio trató de reproducir mentalmente el rápido movimiento de las agujas en las manos de la señora y llegó a la conclusión de que es posible otro modo de manejar las agujas. Corrió muy contento a comunicar su descubrimiento y quedó decepcionado al ver que los dos métodos eran conocidos por las mujeres desde hacía siglos.

Pero habiendo errado un importante descubrimiento en el campo de la topología, Dirac contribuyó mucho al campo de la teoría cuántica relativista. La mecánica ondulatoria, que entones no tenía más que unos años, fue formulada originariamente por Schrödinger para el caso del movimiento de partículas con velocidades pequeñas comparadas con la velocidad de la luz y los físicos teóricos se estaban rompiendo la cabeza en el intento de unir las dos grandes teorías: la de la relatividad y la de los cuanta. Además, la ecuación de onda de Schrödinger consideraba al electrón como un punto, y todos los intentos de aplicarla a un electrón que gira sobre sí mismo con las propiedades de un pequeño magneto, no llevaban a ningún resultado satisfactorio.

En su famoso trabajo publicado en 1930, Dirac formuló una nueva ecuación, que ahora lleva su nombre y que le permitió matar dos pájaros de un tiro. Esa ecuación satisface todos los requerimientos relativistas, aplicándose a un electrón sin importar la velocidad con que se mueva y al mismo tiempo lleva automáticamente a la conclusión de que el electrón debe comportarse como una pequeña peonza magnetizada que gira sobre sí misma. La ecuación relativista de onda de Dirac es demasiado complicada para ser discutida aquí, pero el lector puede estar seguro de que es completamente correcta.

Pero, por buena que fuera la ecuación de Dirac, llevó inmediatamente a una complicación muy seria, precisamente a causa de que unía perfectamente la relatividad y los cuanta. La dificultad procede del hecho (no expuesto en el Capítulo 6) de que la mecánica relativista conduce a la posibilidad matemática de dos mundos diferentes: uno, un mundo "positivo" en el que vivimos y otro, un extraño mundo "negativo" que desafía nuestra imaginación. En este mundo "negativo" todos los objetos tienen masa negativa, lo que significa que, al ser empujados en una dirección, comenzarán a moverse en la dirección opuesta. Por una obvia analogía podemos llamar a los electrones con masa negativa "átomos asnos". En ese mundo de masa negativa, ocurrirían cosas extrañas. Así, para hacer moverse un objeto hacia adelante habría que impulsarlo hacia atrás y para detenerlo habría que empujarlo hacia adelante. Debido a sus cargas eléctricas existen fuerzas de repulsión entre ellos. Si ambos electrones son "ordinarios", estas fuerzas les prestarán aceleraciones en direcciones opuestas y los electrones se separarán a gran velocidad. Si, no obstante, uno de estos dos electrones es un "asno", la fuerza de repulsión lo moverá hacia el otro electrón mientras este otro electrón se aleja de él. Como ambas aceleraciones son numéricamente iguales, los dos electrones se moverán con velocidad siempre creciente, persiguiendo el electrón "asno" al electrón normal. No hay en esto contradicción con la ley de conservación de la energía. La energía cinética del electrón normal es $+\frac{1}{2}mv^2$ mientras para el electrón "asno" tenemos:

$$-\frac{1}{2}mv^2$$

Así, pues, la energía total del sistema es $+\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv^2 = 0$, es decir, precisamente la misma que cuando están en reposo.

Nadie ha observado nunca electrones asnos, piedras asnos, o planetas asnos; esto es una solución ficticia adicional de las ecuaciones de la mecánica de Einstein. Y antes de que Dirac uniera la relatividad y la teoría cuántica no había motivo para preocuparse. En efecto, un electrón normal en reposo tiene la energía $m_0 \cdot c^2$ y cuando se mueve con la velocidad v su energía cinética debe sumarse a ello. Un electrón "asno", por otra parte, tiene cuando está en reposo la energía $-m_0c^2$, y su movimiento se traducirá en una energía cinética negativa adicional. Así, el diagrama de la energía de las dos clases de electrones aparece como se ve en la Figura 45.

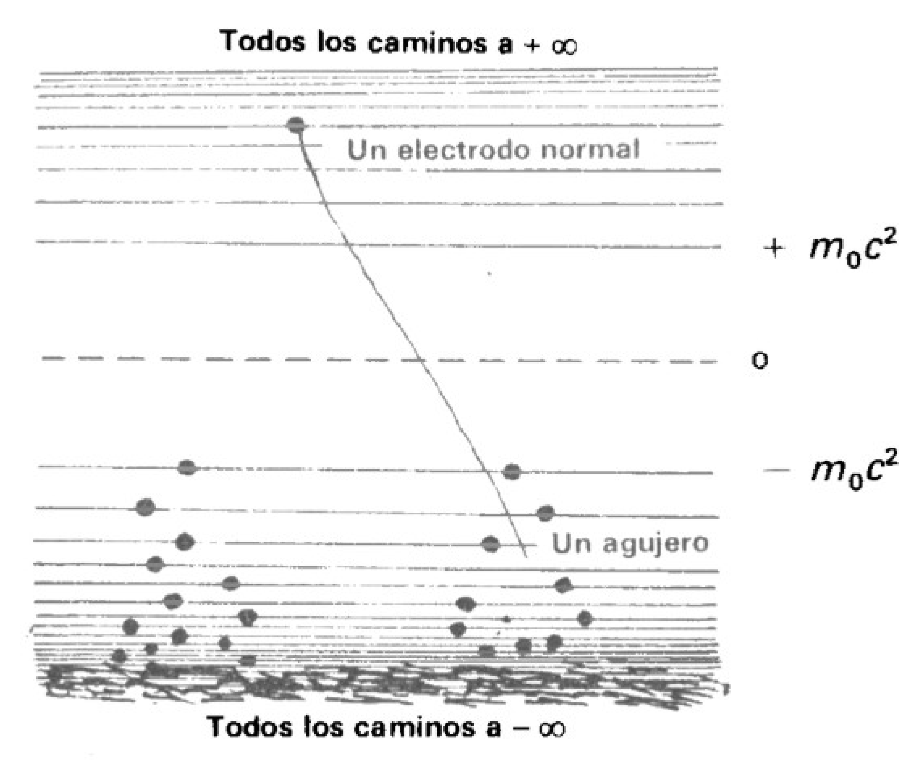


Figura 45. Océano de Dirac de "electrones asnos" representando la formación de un par de electrones (uno, positivo, y otro, negativo).

Está separado en dos partes, la superior para un electrón ordinario y la inferior para los "asnos", las dos partes separadas por la diferencia entre m_0c^2 y m_0c^2, que no corresponde a ninguna clase de movimiento posible. Así, si el movimiento de las partículas es continuo, no hay modo de que puedan cambiar de la parte superior del

diagrama a la inferior y se puede salvar la dificultad diciendo sencillamente: *"Nuestros electrones son partículas bien educadas con masa positiva y no damos un comino sobre otra posibilidad matemática*."

Sin embargo, no podemos salvar tan sencillamente la dificultad si unimos las teorías de la relatividad y los cuanta. En efecto, según la última, los electrones saltan de un nivel de energía a otro, no hay transición continua entre los dos estados de movimiento. Si los electrones saltan de una órbita de Bohr a otra, emitiendo su energía en la forma de cuanta de luz, ¿por qué no pueden saltar del nivel superior de energía al inferior en la Figura 45? Pero si esto fuera posible, todo electrón normal saltaría hacia abajo a los establos "asnales" de la energía negativa y, como resultado de perder cada vez más energía por radiación, se moverían más rápidamente ganando energía cinética... Naturalmente, esto no ocurre, pero ¿por qué?

La única manera con que Dirac pudo salvar esta dificultad fue suponer que todos los estados de energía negativa están completamente cubiertos por electrones "asnos" y que a los electrones de energía positiva les está prohibido caer en ellos por virtud del principio de exclusión de Pauli. Naturalmente, esto significa que el vacío no es vacío ya, sino que está lleno de electrones "asnos" moviéndose en todas las direcciones posibles con todas las posibles velocidades. En efecto, cada unidad de volumen del vacío debe contener un número infinito de estas partículas que se contradicen a si mis-mas. ¿Por qué no nos damos cuenta de ellas? La explicación es bastante enigmática. Imagínese un pez de aguas profundas que nunca sube a la superficie del océano y, por tanto, no sabe que encima de él el agua termina en algún lado. Si este pez es bastante inteligente para reflexionar sobre lo que le rodea, nunca pensaría que el agua era un "medio", sino que la consideraría como un "espacio libre". Del mismo modo, puede razonarse que los físicos no perciben este rebaño infinitamente denso de electrones "asnos" a causa de que están distribuidos de modo absolutamente uniforme en el espacio. Desde luego, esta idea huele al anticuado éter cósmico pero era digna de ser investigada. Volviendo a nuestro inteligente pez de aguas profundas, podemos imaginar que se formaría la noción de gravedad al observar que botellas vacías de cerveza y otros desechos e incluso barcos enteros descienden al fondo del océano. Pero un día algo de aire encerrado

en la cabina de un buque náufrago fue liberado y nuestro inteligente pez observa una hilera de brillantes burbujas plateadas que se elevan hacia la superficie del océano. ¿Cómo pueden moverse hacia arriba cuando la gravedad hace descender todas las cosas?

Ahora bien, Dirac tiene ideas semejantes sobre su océano lleno completamente de electrones en el estado de energía negativa. Supongamos que hay una burbuja en el océano de Dirac, es decir, que falta uno de los electrones "asnos". ¿Cómo lo percibiría un físico? Como la ausencia de una carga negativa es equivalente a la presencia de una carga positiva, lo vería como una partícula cargada positivamente. Por tanto, conforme a la analogía con las burbujas, el signo de la masa se invertiría y la falta de la masa negativa sería percibida como presencia de la masa positiva. ¿No podría ser que esa burbuja en el océano de Dirac no sea otra cosa que un protón ordinario? Es una idea brillante, pero que no funciona. Dirac trató de explicar la masa mucho mayor de las burbujas, supuestas protones, por la elevada viscosidad resultante de las interacciones entre los electrones asnos, pero fracasó en el intento. La masa de las partículas burbujas cargadas positivamente resultó ser siempre exactamente igual a la masa de un electrón ordinario. Las dificultades aumentaron por virtud de los cálculos de Pauli que ha mostrado que si el protón fuera realmente una burbuja en el océano de Dirac, el átomo de hidrógeno no podría existir más que una parte despreciable de un segundo. En efecto, si el átomo de hidrógeno fuera "una gotita girando en torno a una burbuja", la gotita caería en la burbuja y llenaría su cavidad quedando el átomo de hidrógeno aniquilado en un instante. En esta situación, Pauli propuso lo que se conoce como "segundo principio de Pauli", según el cual cualquier idea nueva formulada por un físico teórico es aplicable inmediatamente a todos los átomos que forman su cuerpo. Conforme a este principio, el cuerpo de Dirac quedaría aniquilado en una pequeña fracción de un microsegundo después de haberla concebido y entonces otros físicos teóricos se hubieran librado de oírla.

En el año 1931, un físico americano, Carl Anderson, estudiaba los rastros dejados en una cámara de niebla por los electrones de alta energía que hay en la lluvia de rayos cósmicos. Para medir la velocidad de estos electrones colocó la cámara de niebla en un fuerte campo magnético y, con gran sorpresa suya, las fotografías

mostraron que una mitad de los electrones era desviada en una dirección mientras otra mitad sufría la desviación en sentido opuesto. Así pues, allí había una mezcla del 50 % de electrones cargados positivamente y el 50% de electrones cargados negativamente, pero todos con la misma masa. Estos eran los agujeros en el océano de Dirac que fracasaron en graduarse de protones, pero emergieron como partículas por propio derecho. Los experimentos con los electrones positivos o positrones, como ahora se les llama, confirmaron rápidamente todas las predicciones basadas en la teoría de los agujeros de Dirac. El par de un electrón positivo y otro negativo puede ser producido por el impacto de un cuanto de luz de alta energía (rayos gamma o rayos cósmicos) contra los núcleos atómicos, y la probabilidad de estos sucesos coincidió exactamente con los valores calculados sobre la base de la teoría de Dirac. Se observó que moviéndose a través de la materia ordinaria los positrones eran aniquilados en sus colisiones con los electrones ordinarios, siendo liberada la energía equivalente a su masa en la forma de fotones de elevada energía. Todos los detalles fueron, de hecho, exactamente como se había predicho.

Pero ¿qué decir sobre la fantástica teoría que considera los electrones positivos como agujeros en una distribución infinitamente densa de electrones con masa negativa? Bueno; la teoría es una teoría y está justificada por su acuerdo con la prueba experimental, nos guste o no nos guste. Se ha visto, desde la publicación del trabajo original de Dirac que, de hecho, no es necesario suponer la existencia de océanos infinitamente densos de electrones con masa negativa, y que los positrones pueden ser considerados para todas las finalidades prácticas como los agujeros en un espacio absolutamente vacío.

13. Antimateria

Después del descubrimiento de los electrones positivos, los físicos pensaron en la posibilidad de protones negativos que estuvieran en la misma relación con los protones positivos ordinarios que los positrones con los electrones. Pero como los protones son casi dos mil veces más pesados que los electrones, su producción requeriría energías de hasta varios miles de millones de electrovoltios. Así comenzó

una serie de ambiciosos proyectos para construir aceleradores de partículas[27] que pudieran suministrar esa cantidad de energía a los proyectiles nucleares, y en los Estados Unidos se puso la piedra angular para dos de estos superaceleradores: un bevatrón en el Laboratorio de Radiación de la Universidad de California, en Berkeley, y un cosmotrón en el Laboratorio Nacional de Brookhaven en Long Island (N. Y.). La carrera fue ganada por los físicos de la costa Oeste, Emilio Segré, O. Chamberlain y otros, que anunciaron, en octubre de 1955, que habían observado protones negativos emitidos por blancos bombardeados mediante proyectiles atómicos con 6,2 mil millones de electrovoltios.

La dificultad primordial para observar los protones negativos formados en el blanco bombardeado era que se esperaba que estos protones fueran acompañados de decenas de miles de otras partículas (mesones pesados) formadas también durante el impacto. Así, los protones negativos habían de ser filtrados y separados de todas las demás partículas acompañantes. Esto se consiguió mediante un complicado "laberinto", constituido por campos magnéticos, estrechas ranuras a través de las cuales únicamente podían pasar las partículas que poseyeran las propiedades esperadas de los antiprotones. Cuando el enjambre de partículas procedentes del blanco (situado en el haz bombardeante del bevatrón) pasaba a través de este laberinto se esperaba que únicamente llegaran a su extremo opuesto los protones negativos. Cuando la máquina comenzó a funcionar los cuatro experimentadores vieron con satisfacción a las partículas rápidas salir a razón de una cada seis minutos por la abertura posterior. Como demostraron experimentos posteriores, las partículas eran genuinos protones negativos formados en el blanco bombardeado por el haz de elevada energía del bevatrón. Se vio que su masa tenía el valor de 1.840 masas de electrón, que es precisamente la masa de un protón positivo ordinario.

Lo mismo que los electrones positivos producidos artificialmente son aniquilados cuando pasan a través de una materia corriente que contiene una multitud de electrones negativos ordinarios, se esperaba que los protones negativos fueran aniquilados al encontrar protones positivos en los núcleos atómicos con que chocan. Como la energía implicada en el proceso de aniquilación protón-antiprotón excede,

[27] Véase, en el capítulo VIII, la sección titulada "Los primeros casca-núcleos.

por un factor de casi dos mil, la energía implicada en una colisión electrón-antielectrón, el proceso de aniquilación se realiza con mucha más violencia resultando una "estrella" formada por muchas partículas expulsadas.

La prueba de la existencia de protones negativos representa un excelente ejemplo de comprobación experimental de una predicción teórica relativa a las propiedades de la materia, aunque en la época en que fue formulada la teoría pudo haber parecido increíble. Fue seguida, en el otoño de 1956, por el descubrimiento de los antineutrones, es decir, partículas que están en la misma relación con los neutrones ordinarios que los protones negativos con los positivos. Como en este caso falta la carga eléctrica, la diferencia entre neutrones y antineutrones puede ser observada únicamente sobre la base de la capacidad de aniquilarse mutuamente.

Como los protones, neutrones y electrones que forman los átomos de la materia ordinaría pueden existir en esos anti-estados, podemos pensar en una antimateria formada por esas partículas. Todas las propiedades físicas y químicas de la antimateria deben ser las mismas que las de la materia ordinaria, y la única manera de decir que dos piedras son anti, una respecto a la otra, es ponerlas juntas. Si no ocurre nada es que son de la misma base de materia; si se aniquilan en una tremenda explosión son "anti".

La posible existencia de la antimateria plantea tremendos problemas a la astronomía y la cosmología. Toda la materia que hay en el Universo, ¿es de la misma clase o hay trozos de nuestra clase de materia y de antimateria esparcidos irregularmente por el espacio infinito? Hay razones muy fuertes de que, dentro de nuestro sistema estelar de la Vía Láctea, toda la materia es del mismo género. En efecto, si no fuera así, el proceso de aniquilación entre las estrellas y la difusa materia interestelar produciría una fuerte radiación observable. Pero nuestro vecino más cercano en el espacio es la gran Nebulosa de Andrómeda y los cientos de millones de otras galaxias estelares desparramadas por el espacio dentro del alcance del telescopio de 200 pulgadas del Observatorio de Monte Palomar ¿están formadas por el mismo género de materia o tenemos allí una mezcla por mitades iguales? Si toda la materia del universo es de la misma clase ¿por qué es así? Y si es en parte materia ordinaría y en parte antimateria ¿cómo estas dos fracciones que se excluyen mutuamente se han separado una de otra? Nosotros carecemos de

respuestas a cualquiera de estas cuestiones y únicamente podemos esperar que las futuras generaciones de físicos y astrónomos sean capaces de resolver el misterio.

14. Estadísticas cuánticas

La teoría cuántica del movimiento ha dado un grave golpe a la teoría cinética del calor expuesta en el Capítulo 4. En efecto, si los electrones que se mueven dentro del átomo únicamente pueden tener ciertos valores discretos de energía cinética, lo mismo tiene que aplicarse a las moléculas de gas que se mueven dentro de una vasija cerrada.

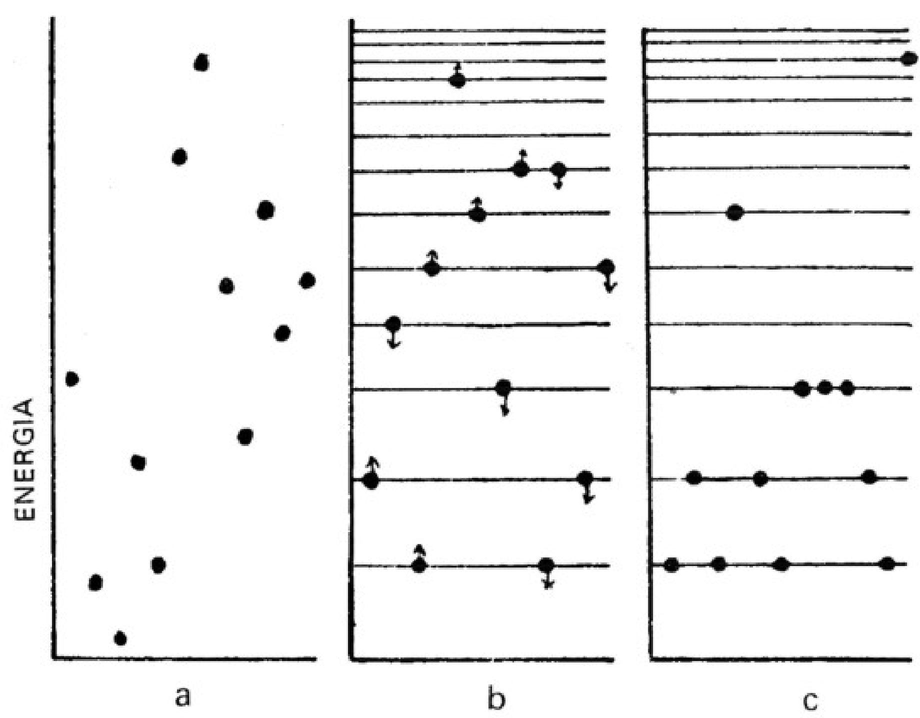


Figura 46. Tres clases de tratamiento estadístico de la energía de doce partículas de gas.

Así, pues, considerando la distribución de energía entre moléculas de gas, ya no se puede suponer que las moléculas de gas pueden poseer cualquiera energía cinética Figura 46 a, como se suponía en las teorías clásicas de Boltzmann, Maxwell, Gibbs y otros. Por el contrario, debe haber definidos niveles cuánticos, determinados por el tamaño de la vasija y no puede haber energías intermedias entre esos niveles. La situación se complica por el hecho de que algunas partículas (como los electrones)

obedecen al principio de Pauli que prohíbe ocupar el mismo nivel cuántico a más de dos, mientras que otras partículas, como las moléculas del aire, no están sujetas a estas restricciones. Este hecho lleva a dos clases diferentes de estadísticas: la llamada estadística Fermi-Dirac aplicable a las partículas que obedecen el principio de Pauli y la estadística Bose-Einstein aplicable a las partículas que no lo obedecen. La Figura 46 b, c, trata de aclarar la diferencia entre estos dos tipos de estadística. El desarrollo completo de las estadísticas cuánticas es muy excitante, pero sumamente difícil de explicar sin emplear una terminología "técnica".

Así pues, puede decirse que las dos nuevas estadísticas no difieren prácticamente de las estadísticas clásicas en todos los casos de la vida cotidiana, tal como el aire atmosférico. Pueden esperarse y observarse desviaciones solamente en casos tales como el electrón de gas en los metales y en las llamadas estrellas "blancas enanas" en que rigen las leyes de Fermi-Dirac y en los gases ordinarios a una temperatura muy próxima al cero absoluto en que prevalecer las leyes de Bose-Einstein. Podemos esperar que los lectores de este libro que hayan sido seducidos por el tema procederán al estudio de la física moderna en una forma más avanzada. En este caso, los problemas de la estadística cuántica les parecerán tan claros como el cristal, después de media docena de años de estudio.

Capítulo 8
El núcleo atómico y las partículas elementales.
Descubrimiento de la radiactividad

A principios de 1896, el físico francés Henri Becquerel, después de conocer el reciente descubrimiento de los rayos X por Roentgen, decidió ver si algo semejante a los rayos X era emitido también por los cuerpos fluorescentes de los que se sabía que resplandecen bajo la acción de los rayos incidentes de luz. Para estos estudios, escogió cristales de un mineral conocido como "uranilo" (doble sulfato de uranio y potasio) que había estudiado antes a causa de sus acusadas propiedades fluorescentes. Como Becquerel creía que la radiación es el resultado de la iluminación exterior, colocó un cristal de uranilo sobre una placa fotográfica envuelta en papel negro y puso todo ello en el antepecho de la ventana. Cuando reveló la placa después de unas cuantas horas de exposición a la luz del sol, observó claramente una mancha oscura debajo del sitio en que había sido colocado el cristal de uranilo. Repitió el experimento varias veces y siempre apareció la mancha oscura, aunque puso papel más negro envolviendo la placa fotográfica.

El 26 y 27 de febrero (1896), el cielo de Paris estaba cubierto de espesas nubes, la lluvia caía intermitentemente y la vida de los bulevares se había refugiado bajo los toldos de los cafés y restaurantes. Desgraciadamente, el profesor Becquerel puso la placa fotográfica recién envuelta con el cristal de uranilo sobre ella en el cajón de su mesa para esperar mejor tiempo. El Sol no apareció hasta el 1 de marzo y aun entonces estaba oscurecido por nubes transeúntes. Sin embargo, Becquerel expuso otra vez su dispositivo a los rayos del sol y pasó después a la cámara oscura para ver los resultados. Era algo increíble. En vez de las manchas oscuras que había obtenido anteriormente durante la exposición de todo un día a la brillante luz del Sol, se vela una mancha negra como el carbón debajo del sitio en que había estado el cristal de uranilo. Evidentemente el oscurecimiento de la placa no tenía relación alguna con la exposición del cristal de uranilo a los rayos del Sol, y el oscurecimiento de la placa fotográfica se había estado produciendo sin interrupción todo el tiempo en que estuvo con el trozo de uranilo encima en el cajón cerrado de la mesa de Becquerel.

Era una radiación penetrante semejante a los rayos X, pero emanaba por sí misma, sin ninguna excitación externa, sino procedente de los átomos, probablemente los de uranio en el cristal de Becquerel. Este ensayó calentar el cristal, enfriarlo, pulverizarlo, disolverlo en ácidos y hacer todo lo que se le pudo ocurrir, pero la intensidad de la misteriosa radiación seguía siendo siempre la misma. Era claro que la nueva propiedad de la materia, que recibió el nombre de radiactividad, no tenía relación alguna con la forma física o química en que los átomos se reúnen, sino que es una propiedad oculta profundamente dentro del átomo mismo.

1. Elementos radiactivos

Durante los primeros años después del descubrimiento de la radiactividad, gran número de químicos y físicos estuvieron muy ocupados estudiando el nuevo fenómeno. Madame Marie Sklodowska Curie, nacida en Polonia, buena química y mujer del físico francés Pierre Curie, realizó un extenso ensayo de todos los elementos químicos y sus compuestos para conocer su radiactividad y encontró que el torio emite radiaciones similares a las del uranio. Comparando la radiactividad de los minerales de uranio con la del uranio metálico, advirtió que los minerales eran cinco veces más radiactivos que lo que podía esperarse de su contenido de uranio. Esto indicaba que el mineral debía contener pequeñas cantidades de algunas otras sustancias mucho más activas que el propio uranio, pero para separarlas eran necesarias cantidades muy grandes del caro mineral de uranio. Madame Curie logró obtener del Gobierno austríaco una tonelada de residuos sin valor (en aquel tiempo) del uranio producido en Joachimsthal (Bohemia), que, privados del uranio, retenían todavía la mayor parte de su radiactividad. Conducida por el hilo de Teseo de la radiación penetrante, Madame Curie se las arregló para separar una sustancia que tenía propiedades químicas similares al bismuto a la que llamó polonio en honor de su país natal. Siguió trabajando y aun separó otra sustancia química similar al bario a la que llamó radio, que era dos millones de veces más radiactiva que el uranio.
Los exploradores, tanto en países nuevos y desconocidos como en los nuevos campos de la ciencia, suelen ser víctimas de los peligros ocultos que encuentran en su camino. La muerte de Madame Curie, a sus 67 años, fue originada por la leucemia, una enfermedad que, según se sabe ahora, proviene de la exposición a la

radiación penetrante. Cuando los físicos supieron mejor cómo preservarse contra la radiación, pusieron películas fotográficas entre las hojas de los libros del laboratorio de Madame Curie. Las películas reveladas mostraron numerosas huellas digitales producidas por los depósitos radiactivos en las páginas tocadas por los dedos de Madame Curie. Al descubrimiento del polonio y el radio siguió el de otras sustancias radiactivas. Entre ellas estaba el actinio, un pariente próximo del uranio desintegrable, que fue aislado por Debierne y Giesel; el radio-torio y el mesotorio, separados por Otto Hahn que unos cuarenta años después descubría el fenómeno de la desintegración del uranio.

2. Familias radiactivas

En el aspecto físico de la cuestión, el trabajo avanzó en el estudio de las propiedades de la radiación penetrante. En 1899, Ernest Rutherford (entonces de 28 años) descubrió que había tres clases diferentes de rayos:

- Rayos alfa (α), que pueden ser detenidos por una hoja de papel y que se comprobó eran los iones del helio. (En realidad, eran núcleos de átomos de helio, pero Rutherford no lo supo hasta que realizó los experimentos de dispersión, ya expuestos, doce años después.)
- Rayos beta (β), que pueden pasar a través de hojas de aluminio de unos cuantos milímetros de espesor y que resultaron ser haces de electrones que se mueven muy rápidamente.
- Rayos gamma (γ), que pueden penetrar planchas de plomo, de muchos centímetros de espesor y que son similares a los rayos X, aunque de longitud de onda mucho más corta.

Es habitual que en los libros de texto de física (incluso en los publicados antes por este autor) se reproduzca un diagrama como el de la Figura 47 que muestra la desviación de los rayos alfa, beta y gamma cuando pasan a través de un campo magnético (o eléctrico). El haz alfa se curva hacia la izquierda (carga positiva), el haz beta hacia la derecha (carga negativa) y el haz gamma queda sin desviación (ondas electromagnéticas). Es dudoso, sin embargo, que tal experimento pudiera haberse realizado durante los primeros estudios de la radiactividad (una desviación

perceptible de las partículas alfa requiere electromagnetos extraordinariamente fuertes que no fueron construidos hasta mucho después) y la diferencia entre los rayos alfa y beta fue establecida por métodos indirectos mucho más intrincados.

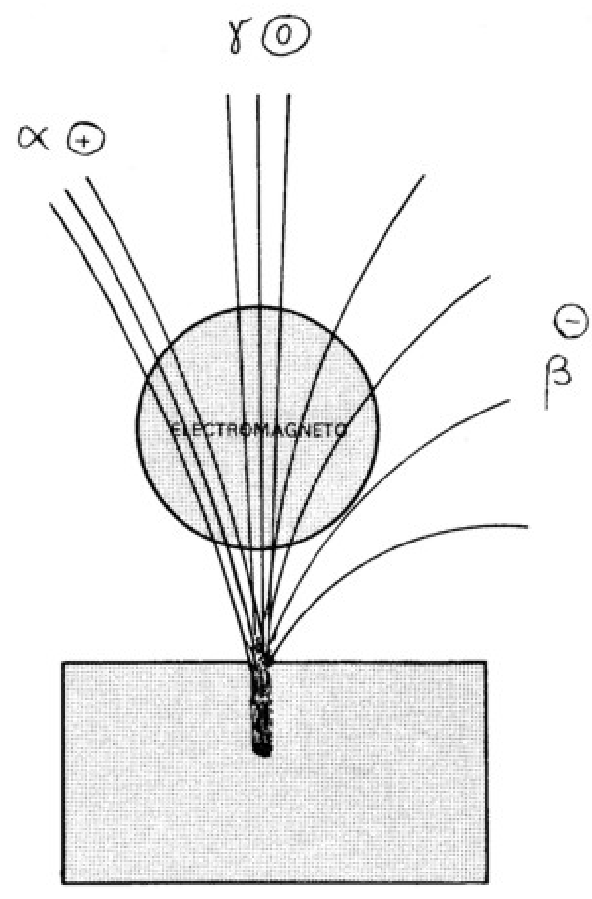


Figura 47. Rayos alfa, beta y gamma

Muy pronto, Rutherford y su colaborador, Frederick Soddy, llegaron a la conclusión de que el fenómeno de la radiactividad es el resultado de la transformación espontánea de un elemento químico en otro. La emisión de una partícula alfa con carga +2 y masa 4 da por resultado la formación de un elemento que está situado dos pasos a la izquierda en el sistema de Mendeleiev y cuyo peso atómico es 4 unidades menos. La emisión de una partícula beta (un electrón negativo) lleva al elemento un paso a la derecha en el sistema de Mendeleiev y no cambia en nada su peso atómico. La emisión de rayos gamma es el resultado de una perturbación en el átomo debida a la expulsión de una partícula cargada positiva o negativamente. La serie de las sucesivas degradaciones alfa y beta degrada los pesados e inestables

átomos de los elementos radiactivos reduciendo su peso y número atómicos hasta que, por último, llegan a un estado estable que es un átomo de plomo.

Como una degradación alfa modifica el peso atómico en 4 unidades mientras que la degradación beta no cambia el peso atómico, pueden existir cuatro familias de elementos radiactivos:

1. Aquellos cuyo peso atómico es múltiplo de cuatro: 4n.
2. Aquellos con peso atómico 4n + 1.
3. Aquellos con peso atómico 4n + 2.
4. Aquellos con peso atómico 4n + 3.

El peso atómico del uranio es 238; es decir, 4 x 59 + 2. Así, pues, el uranio y todos los miembros de su familia derivados de degradación alfa y beta pertenecen a la tercera de las categorías mencionadas. El peso atómico del torio es 232; es decir, 4 x 58, de suerte que la familia del torio pertenece a la primera categoría. El protactinio que degenera en actinio y los otros miembros de la familia del actinio tiene peso atómico 231; es decir, 4 x 57 + 3, perteneciendo, por tanto, a la cuarta categoría. Una familia radiactiva con peso atómico 4n + 1 (segunda categoría) no existe en la naturaleza, Pero puede ser producida artificialmente en las pilas atómicas.

Por el duro esfuerzo de los primeros investigadores de la radiactividad se han podido construir los árboles genealógicos de las familias radiactivas existentes. Véase, en el esquema adjunto, la degradación de la familia del uranio que comienza con el viejo uranio 238 y, después de ocho transformaciones alfa y seis beta, acaba en el plomo estable 206.

Las dos cifras sobre el nombre de cada elemento radiactivo expresan su número atómico y su peso atómico, mientras la cifra por debajo es el período medio de vida en años, días, horas, minutos y segundos. Se pueden construir esquemas similares de degradación para el torio, el protactinio y la cuarta familia (sin nombre) producida artificialmente.

								90-234 UX 1 245d	92-238 U 1 4.5×10^9a
								91-234 UX 2 11m	
		82-214 RaB 27m	84-218 RaA 3m		86-222 Rn 3.8d	88-226 Ra 1,590a	90-230 Io 8.3×10^4a	92-234 U II 2.7×10^5a	
	81-210 RaC" 13m	83-214 RaC 20m							
	82-210 RaD 22a	84-214 RaC' 10^{-4}s		DEGRADACIÓN BETA			DEGRADACION ALFA		
	83-210 RaE 50d								
82-206 Pb estable	84-210 Po 137d								

Tabla I

3. La ley de supervivencia

Si se sigue la historia de la vida de un grupo de bebés o de cachorrillos o patitos o cualesquiera otra clase de animales nacidos en el mismo día, se ve que no por eso mueren el mismo día. Algunos viven más tiempo, otros menos, y si se calcula el porcentaje de los individuos que viven todavía en una cierta fecha, obtenemos una típica curva de supervivencia, como se ve en la Figura 48 a.

La curva indica que hay una cierta "expectativa de vida", como muestra el diagrama, que es de 75 años para un hombre, 15 años para un perro y únicamente unos cuantos años para un pato. Indica también que hay relativamente pocas probabilidades de vivir mucho tiempo después de alcanzarla.

En el caso de los átomos radiactivos, la situación es completamente distinta y las probabilidades de que un miembro de la familia radiactiva formado por la "reencarnación" de su predecesor (por transformaciones alfa o beta) sea "reencarnado" en el miembro siguiente de la familia son independientes del período de tiempo que ha transcurrido desde que se formó.

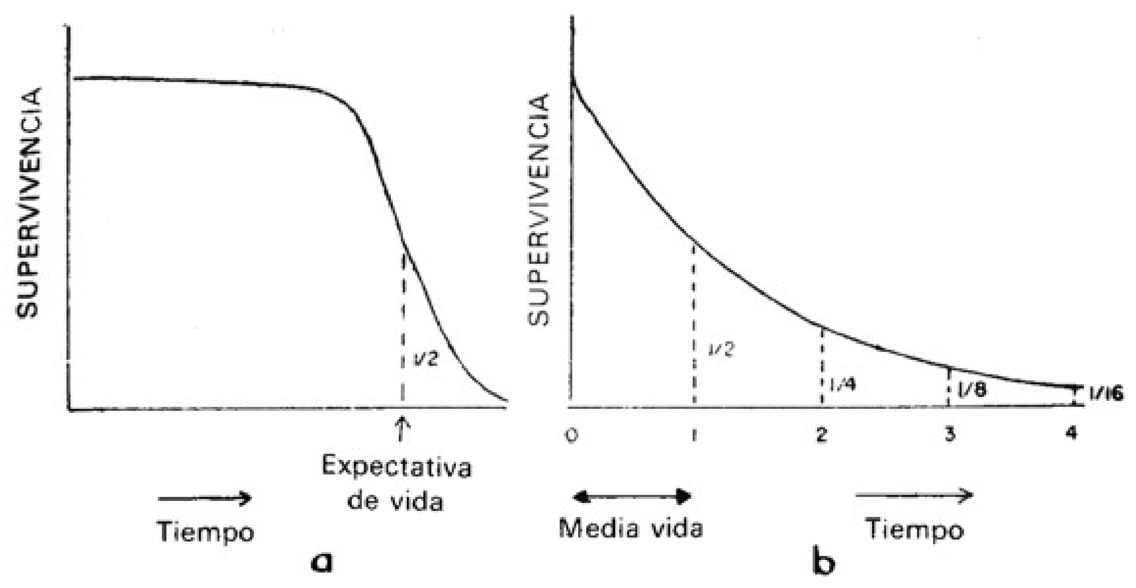


Figura 48. Curvas de supervivencia de animales (a) y núcleos (b).

La situación es similar al caso de los soldados envueltos en una batalla continua con el enemigo, en que muere un cierto porcentaje todos los días y no hay modo de decir qué número morirá mañana. En este caso no podemos hablar ya de "expectativa de vida", sino que debemos introducir la noción bastante diferente de "vida media", es decir, un período de tiempo durante el cual serían muertos una mitad de los soldados o degenerarán la mitad de los inestables átomos radiactivos. La curva que representa este proceso se muestra en la Figura 48 b y es, como la llaman los matemáticos, una "curva exponencial". Los diferentes elementos radiactivos tienen muy diversas "vidas medias". El uranio degenera a razón del 50% en 4,5 miles de millones de años; el radio en 1.590 años, mientras que la mitad de los átomos de RaC' se degradan en solo una diezmilésima de segundo. La existencia de las tres familias radiactivas es debida a la longevidad de sus progenitores, uranio I (ó $_{92}U^{338}$), torio (1,3 x 10^{10} años) y el tatarabuelo protactinio (5 x 10^{8} años), que es comparable con la edad del Universo[28].

[28] El protactinio tiene un período medio de vida de solo 12.000 años, pero el precursor de la familia actinio, del cual se deriva el protactinio por una degeneración a y una degeneración b, tiene una vida media de 500 millones de años. No tiene un nombre relacionado con la familia actinio, pero, por ser un isótopo del uranio se le llama sencillamente U-235. Al emitir una partícula a, el $_{82}U^{235}$ se transforma en $_{90}VY^{231}$ que, por la siguiente degeneración b se convierte en $_{91}Pa^{231}$. El U-235 lleva el nombre de la familia uranio, pero, en realidad, pertenece a la familia actinio (tipo 4n + 3) y es el famoso uranio "desintegrable" que ha hecho posible el desarrollo de las bombas atómicas y reactores nucleares.

No hay en la Naturaleza ninguna familia del tipo 4n + 1 porque, como se ha visto, cuando estos núcleos fueron producidos artificialmente en las pilas atómicas, el cabeza de familia tiene una vida sumamente corta y toda la familia tuvo que haber degenerado completamente desde hace mucho tiempo.

4. Las barreras resquebrajadas

La explicación de la lentitud de las transformaciones alfa fue dada independientemente por el autor de este libro, que entonces trabajaba en Alemania, y por el equipo de Ronald Gurney (Australia) y Edward Condon (Estados Unidos). Está basada en la mecánica ondulatoria. Se sabía que los núcleos atómicos están rodeados por elevadas barreras de fuerza eléctrica que fueron investigadas primeramente por Rutherford en los experimentos sobre la dispersión de las partículas alfa. Cuando una partícula alfa se aproxima al núcleo está sometida a la repulsión que es proporcional al producto de la carga nuclear (Ze) por la carga de la partícula alfa (2e) dividida por el cuadrado de la distancia entre ellos. Cuando la partícula se pone en contacto con el núcleo, las fuerzas cohesivas entre él y la partícula formando el núcleo la impulsan y mantienen estrechamente apretada dentro de él. La curva potencial correspondiente a estas dos clases de fuerzas se ve en la Figura 49 y parece como un baluarte o una barrera con un muro escarpado por dentro y suaves declives por el lado exterior. Para entrar en el núcleo las partículas alfa incidentes han de escalar el muro interno de la barrera y después arrollar por el declive exterior. Al estudiar la dispersión de una partícula alfa en el uranio, Rutherford observó que la barrera que rodea el núcleo de este elemento debe ser por lo menos de $14 \cdot 10^{-6}$ ergios de altura puesto que partículas alfa rápidas emitidas por RaC' y dotadas de esa energía no dan señales de alcanzar la cumbre. Por otra parte, las partículas alfa emitidas por el propio uranio sólo tienen la energía de $8 \cdot 10^{-6}$ ergios. ¿Cómo pueden las partículas que salen con una energía tan pequeña pasar una barrera que es varias veces más alta? Según la mecánica clásica esto es, naturalmente, imposible. Si se construye una barrera de madera sobre la mesa y se rueda hacia ella una bola cuya energía es sólo la mitad de la necesaria para alcanzar la cima, la bola siempre subirá medio camino por el declive y después rodará hacia abajo. Pero la mecánica ondulatoria llega a una conclusión diferente, y

para comprenderlo debemos implicar en la explicación la analogía entre las ondas de De Broglie y las ondas de luz.

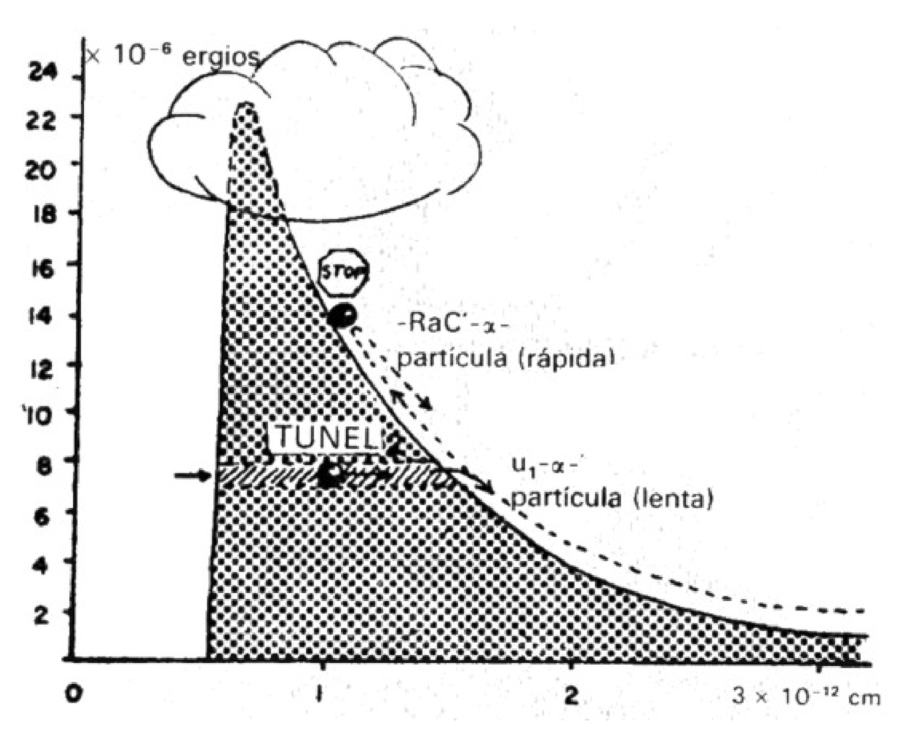


Figura 49. La barrera de potencial en torno al núcleo de uranio tal como resulta de los experimentos de dispersión de Rutherford.

En óptica geométrica nos es familiar el concepto de "reflexión total interna". Si un rayo de luz a través de un cristal (Figura 50 a) choca en la superficie interna AB entre el cristal y el aire bajo un ángulo de incidencia relativamente pequeño, será refractado enteramente en el aire y su nueva dirección será muy próxima a la de la superficie intermedia AB. Pero si el ángulo de incidencia es mayor que un cierto valor crítico, no pasará al aire ninguna luz y el rayo será reflejado totalmente por la superficie intermedia.

Considerando este fenómeno desde el punto de vista de la naturaleza ondulatoria de la luz, se llega, sin embargo, a una conclusión diferente. Resulta que algo de luz entra en el aire al otro lado de la superficie intermedia AB, pero no penetra mucho y es rechazada por una capa de aire sólo unas cuantas longitudes de ondas de espesor. La Figura 50 b, en la que las líneas no son ya rayos de luz, sino que representar la línea de fluencia de la energía radiante, muestra lo que sucede. Si colocamos otra pieza de cristal cerca de la superficie intermedia AB, algunas de las

líneas de flujo que pasan al aire entrarán en este segundo cristal. El fenómeno puede ser observado experimentalmente si la distancia entre los dos cristales es igual a unas cuantas longitudes de onda de la luz (es decir, unos cuantos micrones).

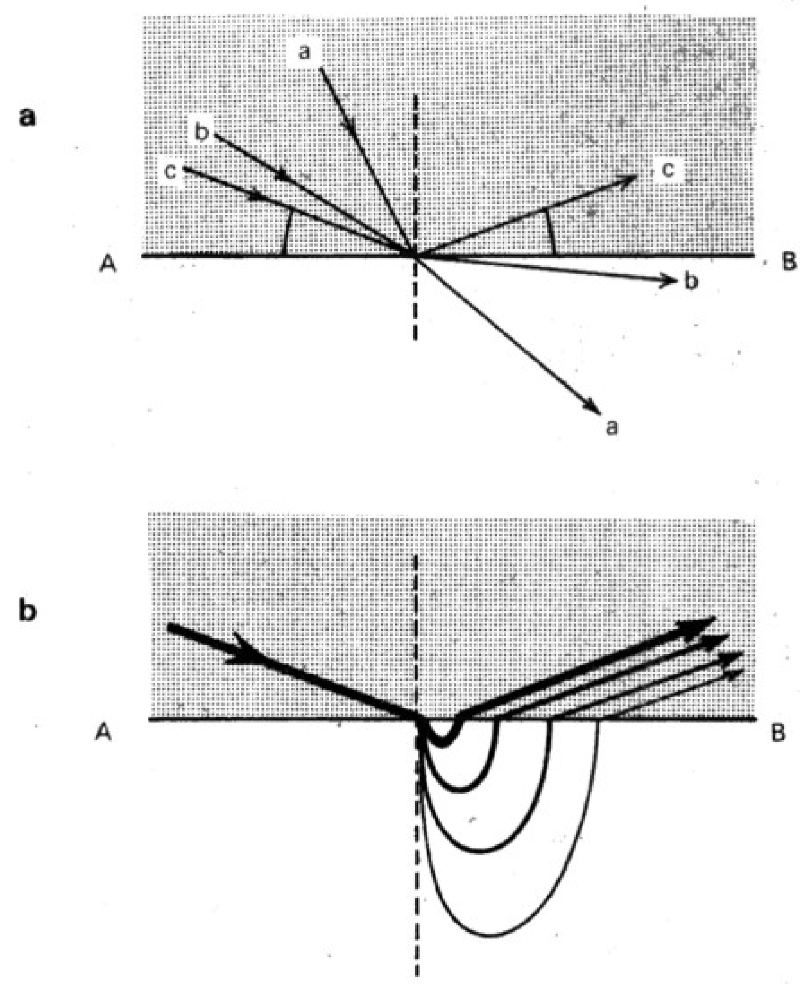


Figura 50. Reflexión total interna de la luz, según la óptica geométrica (a) y según la óptica ondulatoria (b).

Así como la óptica ondulatoria permite la penetración que está completamente prohibida por la óptica geométrica, la mecánica ondulatoria ayuda a las partículas materiales a realizar proezas que serían completamente imposibles si la mecánica clásica fuera correcta en un ciento por ciento.

Las partículas alfa, que existen en el núcleo, se encuentran en estado de movimiento muy rápido, chocando constantemente con las paredes de la barrera potencial que las rodea. Las ondas de De Broglie, que guían el movimiento de las

partículas, se insinúan y cuelan a través de los muros de la barrera, haciendo posible que las partículas alfa pasen a través aunque no pueden subir a la cima. La penetrabilidad de las barreras potenciales del núcleo es sumamente baja, y en el caso del núcleo del uranio únicamente un intento de cada 10^{38} tiene éxito. Como al moverse en el espacio de sólo 10^{-12} cm con una velocidad de 10^{9} cm/s, una partícula alfa choca con el muro interno de la barrera 10^{21} veces por segundo, tarda $10^{38}/10^{21} = 10^{17}$ segundos, o sea, varios miles de millones de años hasta que logre salir. En el caso del núcleo de RaC' la penetrabilidad de la barrera es mayor y uno de sólo 10^{17} intentos tiene éxito. Así, la vida correspondiente es $10^{17}/10^{21} = 10^{-4}$ seg como se había observado. Los cálculos de los períodos de vida media de los diferentes elementos radiactivos sobre la base de esta teoría resultan tan de perfecto acuerdo con las cifras observadas.

No es necesario decir que los fenómenos de mecánica ondulatoria de esta clase sólo son de importancia en el mundo de los átomos y núcleos. En el caso de los experimentos antes descritos en que la bola asciende por el talud con velocidad que no es suficiente para llegar a la cima, hay todavía la posibilidad de que pase la barrera potencial como un fantasma de viejo estilo atravesaba el muro de un castillo, pero estas probabilidades pueden calcularse que sean $10^{-10^{27}}$, es decir, un número que tiene 10^{27} ceros después de la coma decimal. Si se trata de escribir este número, la primera cifra significativa aparecerá en las proximidades de las galaxias más distantes vistas con el telescopio de 200 pulgadas.

6. Constitución nuclear y neutrones

La interpretación del fenómeno de radiactividad como degradación espontánea del núcleo atómico no deja duda de que los núcleos son sistemas mecánicos complejos compuestos de muchas partículas constitutivas. El hecho de que los pesos atómicos de los isótopos de todos los elementos estén representados muy aproximadamente por números enteros indican que los protones deben desempeñar el papel de uno de los componentes nucleares. Pero los protones solos no bastan. En efecto, el núcleo del carbono que tiene peso atómico 12 debe contener 12 protones. Pero, como la carga del núcleo de carbono no es más que 6, debe haber 6 cargas negativas presentes, y se supuso que estas cargas negativas están suministradas

por 6 electrones que se unen a los 12 protones para formar un núcleo de carbono. Sin embargo, la hipótesis de la presencia de electrones dentro del núcleo atómico conducía a serias dificultades desde el punto de vista de la teoría cuántica. En efecto, como las energías de los estados cuánticos de un electrón crecen rápidamente conforme disminuyen las dimensiones de la región en que el electrón está confinado, podía esperarse que los electrones, moviéndose dentro del núcleo atómico, deberían tener las energías de miles de millones de electrovoltios. Esta conclusión directa de la teoría cuántica pareció muy extraña, puesto que mientras las energías de este orden fueron observadas en el caso de los rayos cósmicos, las energías implicadas en los fenómenos nucleares eran millones (y no miles de millones) de electrovoltios. Cuando Niels Bohr informó a Rutherford sobre este hecho, decidieron que era la única manera de salvar la situación era suponer la existencia de protones sin carga eléctrica, que fueron llamados "neutrones". Mediante esta suposición, ya no es necesario en absoluto que existan electrones dentro del núcleo atómico y la composición del núcleo de carbono, por ejemplo, podría ser escrita así: ${}_6C^{12}$ = 6 protones + 6 neutrones.

A mediados de los años veinte, se inició en el Laboratorio Cavendish un proyecto con el propósito de expulsar estos hipotéticos neutrones del núcleo de algunos elementos ligeros para obtener una prueba directa de su existencia. Pero los resultados fueron negativos; los trabajos en este sentido quedaron suspendidos y el descubrimiento de los neutrones se retrasó por un gran número de años. Sólo en 1932, cuando el discípulo de Rutherford, J. Chadwick estudiaba la misteriosa y altamente penetrante radiación (observada primeramente por W. Bothe en el caso de un bombardeo por partículas alfa sobre un blanco de berilio) se probó que estaba formada por una corriente de partículas neutras cuya masa era aproximadamente igual a la del protón. Así, después de los primeros fracasos, el neutrón nació, por fin, dentro de las paredes del Laboratorio Cavendish.

7. Degradación beta y neutrones

Mientras la emisión de las partículas alfa representa una verdadera degeneración nuclear, de la que resulta un producto con un menor peso atómico, la emisión de rayos beta no es más que un ajuste eléctrico del núcleo atómico que resulta de la

emisión de una o más partículas alfa. En la sección anterior hemos visto que los núcleos atómicos se componen de protones y neutrones y que, en los elementos más pesados, el número de neutrones supera al número de protones. Por ejemplo, en el $_{88}Ra^{226}$ el número de neutrones es 226 - 88 = 138, con un número de protones únicamente de 88 y la relación 138/88 = 1,568. El núcleo del $_{86}Ra^{226}$, formado por la degradación del radio, tiene únicamente 136 neutrones y 86 protones con la relación 136/86 = 1,581. Así, pues, en el proceso de la degradación alfa, la relación de los neutrones a los protones aumenta y, después de varios pases alfa, puede ser mayor de lo que es conveniente para la coexistencia pacífica de las dos clases de partículas. En este caso, un neutrón se transforma en un protón por emisión de un electrón negativo o una partícula beta. Por la Tabla I de páginas anteriores, se puede ver que las transformaciones beta siempre ocurren en parejas. Esto es a causa de que los neutrones y protones en el núcleo están sujetos al mismo principio de Pauli que los electrones atómicos y cada nivel cuántico está ocupado por dos de ellos, girando sobre sí mismos en direcciones opuestas. Así, cuando el nivel se hace inestable, dos partículas sufren la transformación beta, una después de otra.

En el año 1914, un joven físico inglés, James Chadwick, trabajaba en la Universidad de Berlín bajo la dirección del notable físico alemán Fritz Geiger (el inventor del contador Geiger). Su trabajo consistía en estudiar el espectro de los rayos beta emitidos por varias sustancias radiactivas, los cuales parecían diferir radicalmente de los rayos alfa y gamma al mostrar una distribución continua de su energía cinética desde casi cero a valores bastante altos.

Cuando el trabajo de Chadwick estaba ya terminado y dispuesto para su publicación en el otoño de aquel año, estalló la primera guerra mundial y Chadwick fue detenido como un extranjero enemigo y enviado a un campo de prisioneros durante toda la guerra. El primer año en el campo fue estúpido, porque el joven y talentoso físico no pudo hacerse amigos entre sus compañeros de prisión, que eran en su mayoría hombres de negocios, viajantes de comercio, etc. Pero, después de alguna gran batalla en algún sitio de Francia, apareció en el campo un nuevo prisionero. Era C. D. Ellis, un brillante oficial que había sido capturado en el campo de batalla. Los dos ingleses se hicieron amigos y para matar el tiempo Chadwick comenzó a enseñar a

Ellis los hechos de la física nuclear. Cuando terminó la guerra, regresaron a Inglaterra y Ellis ingresó como estudiante graduado en la Universidad de Cambridge, en que Chadwick era profesor. Pocos años después, Ellis publicó un libro que representaba una importante ampliación de los estudios de Chadwick.

Una de las explicaciones posibles del espectro continuo de energía de los rayos beta podía ser la gran pérdida de energía sufrida por las partículas beta cuando se escapan de las sustancias radiactivas en que fueron originadas. Ellis proyectó un ingenioso experimento en el cual todos los rayos beta emitidos por una sustancia radiactiva eran absorbidos por un trozo de plomo y el calor producido se media cuidadosamente. El resultado de este experimento demostró que la liberación total de energía por partícula era exactamente igual a la energía media de los electrones en el espectro continuo, lo que probaba que no se producían pérdidas en el material. Así los físicos se encontraron ante una situación paradójica. Mientras en las series de transformaciones radiactivas las partículas alfa emitidas siempre tenían energías exactamente definidas, que son iguales a las diferencias entre los contenidos de energía interna de los núcleos padre e hijo, las energías de las partículas beta varían entre amplios limites. ¿Qué ocurre a la diferencia de energía entre los dos núcleos del mismo elemento radiactivo, uno de los cuales emite una rápida partícula beta y el otro una partícula lenta? Niels Bohr, muy excitado sobre esta situación paradójica, llegó tan lejos como a sugerir que la ley de conservación de la energía no se mantiene en el caso de la transformación radiactiva beta, y mientras que en el caso de la emisión de una partícula beta lenta cierta cantidad de energía puede desaparecer en el aire, en el caso de la emisión de una partícula beta muy rápida puede ser creada de la nada una cantidad adicional de energía. Según esta hipótesis, la ley de conservación de la energía en los procesos nucleares elementales se mantiene solamente como término medio haciendo así imposible construir la máquina de movimiento perpetuo del primer género (véase el Capítulo 4), basada en el proceso de la degradación radiactiva.

Wolfgang Pauli, más conservador en sus opiniones sobre esta cuestión, sugirió una alternativa que equilibraría la contabilidad de la energía de los procesos nucleares. Consideraba la posibilidad de que la emisión de una partícula beta fuera acompañada siempre por la emisión de otra "partícula misteriosa" que escapa a la

observación y se lleva la energía que equilibraría la cuenta. Si se supone que estos "*ladrones de Bagdad*" nucleares no tienen carga eléctrica y tiene una masa tanto o más pequeña que la de los electrones podrían escapar fácilmente, con su saldo de energía, a las barreras más espesas puestas por los físicos. Pauli dio a estos hipotéticos ladrones el nombre de neutrones. (Era antes de que las partículas ahora llamadas neutrones fueran descubiertas por Chadwick en 1932.) Pero todas estas discusiones permanecieron dentro de la esfera de las conversaciones y el nombre nunca fue patentado por el hecho de haber sido impreso en una revista científica. Cuando después del descubrimiento de los neutrones de Chadwick, Enrico Fermi, entonces profesor de la Universidad de Roma, expuso a sus discípulos el trabajo de Chadwick alguno de los oyentes le preguntó si los neutrones de Chadwick eran las mismas partículas de que hablaba Pauli. "*No, respondió Fermi, le neutrone di Chadwick sonno grande. Le neutrone di Pauli erano piccole; egli devono star chiamato neutrini*".

Como ya es costumbre citar en este libro pequeñas anécdotas sobre los grandes físicos y como Enrico Fermi fue uno de los físicos más eminentes de nuestro tiempo, he aquí una anécdota basada en sus propias palabras. Por sus primeros descubrimientos en el campo de la física fue elegido miembro de la Real Academia Italiana de Ciencias y le fue concedido el título de *Eccellenza* por Benito Mussolini. Una vez conducía su pequeño Fiat para ir a una reunión de la Academia que sería presidida por el propio Mussolini, de manera que las puertas principales estaban guardadas por dos *carabinieri*. Estos cruzaron sus fusiles ante el pequeño coche y le preguntaron quién era. "No me creerán si les digo que yo soy un Eccellenza —pensó Fermi— porque todos los que son *Eccellenza* parecen mucho más solemnes y viajan en grandes coches conducidos por chóferes. Así, sonrió a los carabinieri y les dijo que era el chófer de *Eccellenza* Fermi. Esto produjo el efecto deseado y en consecuencia le dejaron entrar y esperar hasta que su señor saliera de la reunión.

Volviendo a los neutrinos, hemos de decir que esta partícula era realmente elusiva y, durante mucho tiempo, los físicos nucleares que la perseguían únicamente pudieron ver el daño que hizo pero no capturar la partícula misma. Sólo en 1955, Fred Reines y Clyd Cowan, del Laboratorio Científico de Los Álamos, lograron apresarla. La fuente más intensa de neutrinos se presenta en las pilas atómicas

donde son emitidas legiones de neutrinos como un resultado de la degradación beta de los productos de fisión formados en la reacción en cadena. Mientras hasta los rayos gamma más penetrantes y los neutrones más rápidos son detenidos eficazmente por muros espesos de cemento que rodean como protección la pila, los neutrinos pasan a través de esta protección tan fácilmente como un enjambre de mosquitos la empalizada de un gallinero. Para detectarlos, Reines y Cowan colocaron fuera de los muros de protección una gran vasija llena de hidrógeno, y rodeada por baterías de contadores de partículas de diferentes géneros. Se esperaba que un neutrino rápido, chocando con un protón, desprendería un electrón positivo, convirtiendo el protón en neutrón P + v = n + e, pero la probabilidad calculada teóricamente de tal proceso era sumamente pequeña. Para detectar este proceso emplearon contadores de neutrones y positrones conectados de tal suerte que únicamente emitirían una señal cuando fueran alcanzados al mismo tiempo por un neutrón y un positrón. Como la probabilidad de tal coincidencia era sumamente pequeña, el choque simultáneo en los dos contadores únicamente podría resultar de la reacción antes escrita. Realizando el experimento con la pila en plena operación, se obtuvieron varias señales por minuto, pero las señales disminuyeron rápidamente cuando la pila fue cerrada. De sus observaciones resultó que la efectiva sección transversal del proceso en el cual un neutrino convierte un protón en un neutrón es únicamente 10^{-43} cm^2, lo que significa que para limitar la intensidad de un haz de neutrinos por un factor dos, es preciso emplear una protección de agua cientos de años luz de gruesa.

La teoría de la transformación neutrón-protón con la emisión de un electrón y un neutrino desarrollada por Fermi está de completo acuerdo con todos los datos experimentales relativos a la degradación beta. Sirve también de prototipo para todas las teorías de degradación desarrolladas después en relación con varios procesos de transformación entre las partículas elementales.

8. Primeros casca-núcleos

Después de que Rutherford se dio cuenta de que el fenómeno de la radiactividad representa una transformación espontánea de un elemento químico en otro, fue acosado por el deseo de romper el núcleo atómico de algún elemento estable y

convertirlo en otro elemento, realizando el antiguo sueño de los alquimistas. Cuando estalló la primera guerra mundial en 1914, el Almirantazgo británico pidió a Rutherford transformar el Laboratorio Cavendish, del que hacía poco había sido nombrado director, en una institución de investigaciones de guerra para desarrollar métodos de guerra antisubmarina contra los submarinos alemanes. Rutherford se negó fundándose en que era una tarea mucho más importante romper el núcleo del átomo. Es verdad que este trabajo de Rutherford abrió el camino para el desarrollo de las armas de guerra más poderosas, las bombas atómica y de hidrógeno, pero no es verdad que Rutherford previese estos desarrollos. En efecto, poco antes de su muerte en 1937, Rutherford sostuvo una acalorada discusión con un físico húngaro, Leo Szillard, sobre la posibilidad de una liberación de energía nuclear en gran escala e insistió en que nunca podría realizarse. Para probar este punto, Leo Szillard fue a una oficina de patentes y sacó una patente para reacciones nucleares en gran escala. Tres años más tarde, la desintegración del núcleo del uranio fue descubierta y tras otros seis años estalló la primera bomba atómica sobre Hiroshima y acabó la segunda guerra mundial. Rutherford estaba indudablemente observando estos desarrollos sentado en una nube etérea y escuchando la música de arpas, pero es más probable que el anciano pensara: “Entonces, ¿qué? ¡Ahora estos... tipos están empleando mis descubrimientos para matarse unos a otros!”

Pero, volviendo al año 1919, debemos ver lo que Rutherford estaba haciendo para cascar el núcleo. Como el muro de la repulsión de Coulomb que rodea el núcleo atómico es cada vez más alto cuando se sigue a lo largo del sistema de los elementos de Mendeleiev, lo mejor sería bombardear los núcleos ligeros. Además, las partículas alfa de elevada energía procedentes de los elementos radiactivos que se degradan rápidamente harían mejor su función que las más lentas. Así, en su primer intento, Rutherford decidió disparar partículas alfa procedentes de RaC' sobre el núcleo del gas nitrógeno y vio con gran satisfacción que, aparte de las numerosas partículas alfa dispersadas por los núcleos de nitrógeno, había también unas cuantas partículas rápidas de otra clase que Rutherford identificó como protones. Las primeras observaciones de Rutherford fueron realizadas por el método de escintilación, pero pronto el estudio de las transformaciones nucleares fue facilitado considerablemente por el uso de una brillante invención, la cámara de

Wilson o cámara de niebla de C. T. R. Wilson, cuyos estudios hemos mencionado en un capítulo anterior en relación con los experimentos de J. J. Thomson. Está fundada en el hecho de que siempre que una partícula cargada eléctricamente que se mueve rápidamente, pasa a través del aire (u otro gas cualquiera) produce ionización a lo largo de su trayectoria. Si el aire a cuyo través pasan estas partículas está saturado de vapor de agua los iones que producen sirven como centros de condensación de pequeñas gotas de agua y vemos largas y delgadas trayectorias de niebla a lo largo de las trayectorias de las partículas. El esquema de una cámara de niebla se ve en la Figura 51.

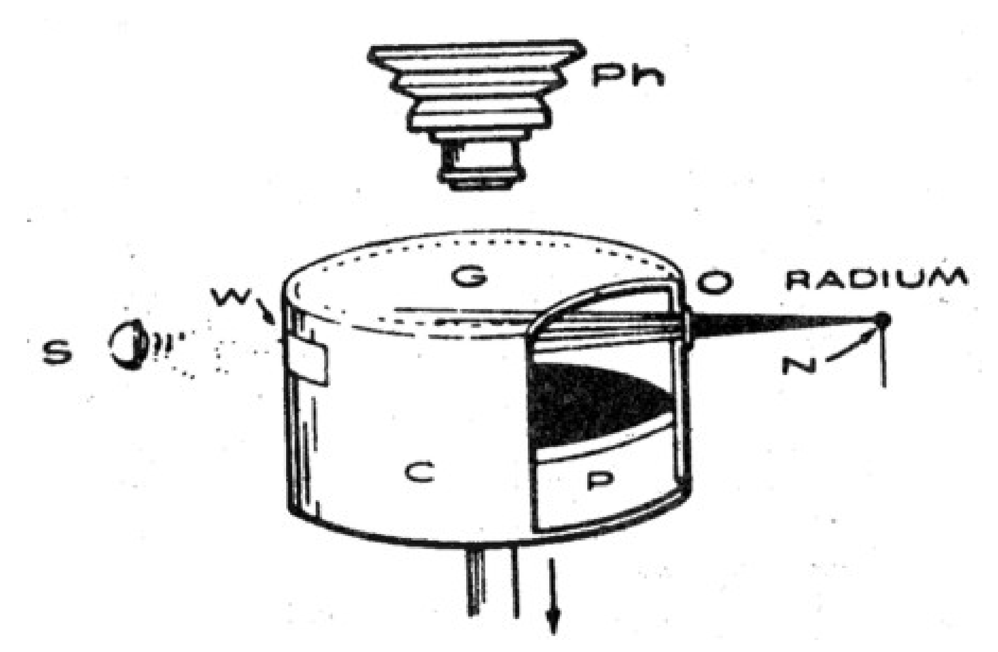


Figura 51. Esquema de la cámara de niebla de C. T. R. Wilson

Consiste en un cilindro de metal C con un techo transparente de cristal G, y un pistón P, cuya cara superior está pintada de negro. El aire entre el pistón y el techo de cristal está al principio casi saturado de vapor de agua e iluminado brillantemente por una fuente de luz, S, a través de una ventana lateral, W. Supongamos ahora que tenemos una pequeña cantidad de una materia radiactiva en el extremo de una aguja, N, que está situada cerca de la abertura O.

Las partículas que son expulsadas por los átomos radiactivos volarán a través de la cámara ionizando el aire a lo largo de sus trayectorias. Sin embargo, como el aire no está completamente saturado de vapor de agua, no se produce ninguna

condensación y los iones positivos y negativos originados por las partículas al pasar se recombinan rápidamente formando moléculas neutrales. Pero supongamos que hacemos descender rápidamente el pistón en una cierta distancia. La expansión del aire encerrado entre el pistón y el cristal del techo hará descender la temperatura del aire y producirá la condensación del vapor de agua de la misma manera que se forman las pubes como resultado de las corrientes de aire húmedo en la atmósfera terrestre. Pero, como la condensación del vapor acuoso está considerablemente facilitada por la presencia de iones producidos por las partículas cargadas que atraviesan la cámara en aquel momento, la formación de niebla tendrá lugar a lo largo de las trayectorias de las partículas y entonces largos trazos de niebla se destacarán claramente sobre el fondo negro en el haz de la luz iluminadora. Este espectáculo puede verse directamente mirando a través del cristal del techo o fotografiándolo por una cámara, P_h.

La primera fotografía de la desintegración artificial nuclear fue tomada en 1925 por P. M. S. Blackett, discípulo de Rutherford. En ella se aprecian numerosas estelas que divergen desde un punto situado allende el borde de la foto y que son producidas por las partículas alfa procedentes de la materia radiactiva situada en esa posición. Esta materia era una mezcla de RaC y RaC' formada desde el RaC por el proceso de la transformación alfa. Las partículas alfa procedentes del RaC se mueven con relativa lentitud y son detenidas por el aire en el centro de la foto. Las partículas RaC alfa, casi las más rápidas emitidas por los elementos radiactivos, pueden penetrar capas más espesas del aire y sus trayectorias acaban en lo alto de la foto. En la parte superior y central de la foto se ve una bifurcación debida a la transformación de un núcleo de nitrógeno por el impacto de una partícula alfa. Un trazo largo y delgado que va hacia la izquierda pertenece a un protón expulsado de su núcleo, mientras que el trazo grueso ascendente se demostró que había sido causado por un núcleo de oxigeno que se movía rápidamente. La transformación alquimista realizada aquí puede ser representada por una fórmula:

$$_7N^{14} + {}_2He^4 \rightarrow {}_8O^{17} + {}_1H^1$$

donde, conforme a una convención, los índices inferiores representan el número atómico y los superiores el peso atómico. El átomo $_8O^{17}$ representa el isótopo más pesado del oxigeno ordinario $_8O^{16}$ y existe en pequeñas cantidades en la atmósfera. Midiendo las energías de $_1H^1$ y $_8O^{17}$, producidas en esta reacción, lo que puede hacerse teniendo en cuenta las longitudes de sus trazos, se ve que es menor que la energía inicial de la partícula alfa por una cantidad de 1,26 mev. Para las masas combinadas en los dos lados de la ecuación de la reacción antes citada encontramos:

He^4 = 4,00388	H^1 = 1,00813
N^{14} = 14,00755	0^{17} = 17,00453
18,01143	18,01266

Así, el saldo de energía, en este caso negativo, es —0,00125 unidades, que equivalen a —1,16 mev. Esta cifra coincide, dentro de los errores experimentales, con la cifra arriba citada para la pérdida de la energía en la reacción. Mediciones de esta clase representaron la primera prueba experimental directa de la ley de Einstein de equivalencia de masa y energía. Así, en esta reacción la energía nuclear no se libera, sino que se pierde. Pero, en otros casos, tal como el bombardeo alfa del aluminio, se ganan considerables cantidades de energía nuclear.

Como las partículas alfa son los únicos proyectiles pesados emitidos por los elementos radiactivos naturales, los primeros trabajos sobre transformaciones nucleares artificiales se limitaron exclusivamente a este tipo de reacción. En 1929, el autor de este libro, trabajando con Lord Rutherford en Cambridge, calculó sobre la base de la teoría de la barrera potencial, que los protones serían proyectiles mucho mejores, tanto por virtud de su carga eléctrica más pequeña como a causa de su masa menor. Los cálculos han mostrado, en efecto, que los protones, acelerados por un potencial eléctrico de un millón de voltios y moviéndose con una energía varias veces menor que la de las partículas alfa procedentes del RaC', debían producir una desintegración observable de los elementos ligeros. Rutherford pidió a sus discípulos J. Cockcroft (ahora Sir John) y E. T. S. Walton que construyeran una máquina de alta tensión que produjese haces de protones de esta

energía, y en 1931 funcionó el primer "quebrantador de átomos". Dirigiendo el haz de protones contra un blanco de litio, Cockcroft y Walton demostraron que a cada impacto afortunado volaban en opuesta dirección, a partir del punto de choque, dos partículas alfa recién producidas. La reacción era, evidentemente,

$${}_{3}Li^{7} + {}_{2}H^{1} \rightarrow 2\ {}_{2}He^{4}$$

Sustituyendo el litio por el boro, observaron triples horquillas, que indicaban que cuando el núcleo de boro es alcanzado por un protón se rompe en tres fragmentos iguales:

$${}_{5}B^{11} + {}_{1}H^{1} \rightarrow 3\ {}_{2}He^{4}$$

El trabajo exploratorio de Cockcroft y Walton fue seguido por el desarrollo de aceleradores de partículas cada vez mayores, basados sobre una variedad de ingeniosos principios. Una clase de quebrantadores atómicos se llama Van de Graaf, por el nombre de su inventor, y está basada en un sencillo principio de electrostática, según el cual una carga eléctrica llevada a través de un abertura dentro de una esfera metálica hueca se distribuye por toda su superficie exterior. En efecto, la mutua repulsión entre los electrones los hace distanciarse lo más posible unos de otros. La máquina de Van de Graaff consiste en una gran esfera metálica aislada y una cinta que corre, la cual es cargada continuamente por la parte exterior y se descarga después de entrar en la esfera. Aunque las tensiones eléctricas que pueden ser producidas en la máquina de Van de Graaff se limitan a unos pocos millones de voltios, ha sido desarrollada en pequeños aparatos muy sólidos, muy convenientes para muchos tipos de trabajos de laboratorio.

Otro aparato para la aceleración de partículas nucleares, mucho más ingenioso, fue desarrollado por Ernest Orlando Lawrence, cuyo nombre ha sido dado al Laboratorio de Radiación de la Universidad de California. Está fundado en un principio completamente distinto y utiliza la aceleración múltiple de partículas cargadas que se mueven en círculo en un campo magnético. El principio del "ciclotrón" está mostrado en la Figura 52. Consiste esencialmente en una cámara metálica circular

cortada en dos mitades, C_1 y C_2, y situada entre los polos de un electromagneto muy enérgico. Las dos medias cámaras, C_1 y C_2, están conectadas con una fuente de alto potencial eléctrico alternativo, AC, de modo que el campo eléctrico a lo largo de la hendidura que las separa cambia periódicamente su dirección. Los iones del elemento que van a ser usados como proyectiles atómicos son inyectados en el centro de la caja, I, a una velocidad relativamente baja, y sus trayectorias se curvan formando pequeños círculos en el campo del magneto.

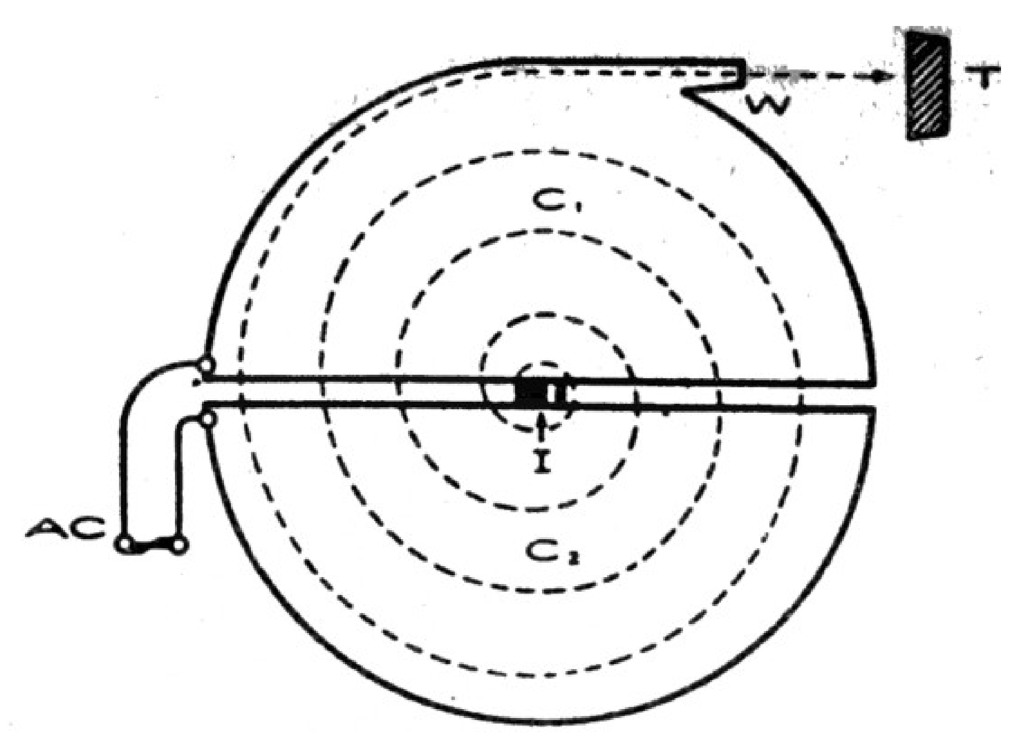


Figura 52. El principio del ciclotrón.

El quid del ciclotrón es que, para un campo magnético dado, el período de revolución de una partícula cargada eléctricamente a lo largo de su trayectoria circular es independiente de la velocidad con que se mueve la partícula. Como el aumento en el radio de la trayectoria y la longitud de esta trayectoria circular es exactamente proporcional al aumento de velocidad, el tiempo necesario para una revolución sigue siendo el mismo.

Si las cosas se disponen de tal modo que el período de revolución de los iones inyectados en el campo del magneto es igual al período de tensión alterna producido por la fuerza AC, las partículas que llegan al límite entre las dos medias

cámaras, C_1 y C_2, estarán sometidas cada vez a una fuerza eléctrica que actúa en la misma dirección en que se mueven las partículas. Así, cada vez que el ión pasa a través de este límite recibirá una aceleración adicional y aumentará su velocidad gradualmente. Acumulando velocidad, los iones se moverán a lo largo de una trayectoria en espiral y, por último, serán expulsados por la ventana W en la dirección del blanco T.

Al describir los resultados de sus experimentos sobre transformaciones nucleares causadas por el bombardeo de diferentes sustancias por proyectiles nucleares rápidos, los físicos hablan siempre de "secciones transversales efectivas" o simplemente de "secciones transversales". Para comprender esta noción, consideremos el caso de una batería antiaérea que trata de abatir un vehículo aéreo hostil que se aproxima. Si el enemigo fuera tan estúpido como para enviar un globo, cualquier tiro en su cuerpo sería fatal y la "sección transversal efectiva" seria igual a la "sección transversal geométrica" del vehículo. Pero en el caso de un avión, los fragmentos de la granada podrían atravesar muchas partes de su estructura, sin que por eso resultare un golpe fatal. No hay más que unas cuantas superficies, tales como la cabeza y el cuerpo del piloto, las partes esenciales del motor y de los mandos de conducción que tienen que ser alcanzados para que el avión caiga. El contorno de la superficie combinada de estos puntos es la "sección transversal efectiva" y se puede considerar mucho más pequeña que el objeto mismo. Así, por ejemplo, la "sección transversal mortal" de Aquiles estaba reducida a unas cuantas pulgadas cuadradas del talón de su pie izquierdo.

Al considerar las probabilidades fatales, sea en el avión enemigo o en el núcleo atómico, no se tiene interés más que en la fracción de la superficie total del contorno que debe ser alcanzada y no necesariamente en la localización exacta de los lugares sensibles. La situación es semejante a la de dos duelistas, uno de ellos muy flaco y el otro muy gordo. El gordo objeta que la situación no es juego limpio puesto que presenta un blanco mayor para la bala de la pistola que su rival: "*Muy bien —dice el delgado—, pida a su padrino que con tiza trace mi silueta sobre su levita y las balas que caigan fuera de esa línea no cuentan*".

El radio de un núcleo atómico es del orden de 10^{-12} cm, así que su sección transversal geométrica es de unos 10^{-24} cm^2. La sección transversal de 10^{-24} cm^2

exactamente se llama un *barn*[29] a causa de que es tan grande, y si un núcleo es quebrantado cada vez que es alcanzado, la sección transversal efectiva es un "barn". Pero si por una u otra razón hay, por ejemplo, únicamente un "muerto" por cada cien disparos diremos que la "sección transversal efectiva" es 0,001 barns o 10^{-26} cm^2. En las consideraciones posteriores, el lector encontrará ejemplos de secciones transversales aun menores en los procesos de bombardeo nuclear.

9. Estructura nuclear y estabilidad

Mientras los electrones atómicos viajan libremente por el espacio, manteniendo distancias que son varios miles de veces mayores que sus diámetros, los protones y neutrones que forman el núcleo atómico están empaquetados tan apretadamente como los arenques en un barril. Así, mientras en el caso de un átomo se puede hablar de atmósfera electrónica que posee muchas propiedades de un gas ordinario, el material del núcleo debe ser comparado con una gota de líquido en la cual las moléculas están mantenidas juntas por las fuerzas de cohesión. El "modelo gota" del núcleo, que fue propuesto por el autor de este libro hace unos treinta años, nos permite comprender muchas propiedades nucleares. En primer lugar, mientras los gases son fácilmente comprimibles a causa del espacio vacío entre las moléculas, los líquidos cambian muy poco de volumen, cualquiera que sea la presión a que estén cometidos. Y, en efecto, hemos visto antes que cuando recorremos el sistema de Mendeleiev, el volumen de los átomos permanece esencialmente invariable cuando son empaquetados cada vez más electrones en las órbitas cuánticas con diámetros cada vez más pequeños. Por otra parte, las mediciones muestran, que el radio del núcleo atómico aumenta como la raíz cúbica de su masa, de modo que el volumen aumenta cuando la masa y la densidad permanecen constantes. La densidad de este fluido nuclear, cuyas gotitas constituyen los núcleos atómicos, supera a la densidad del agua por un factor de 10^{14}, y una vasija llena de él pesaría cinco mil millones de toneladas. Como cualquier otro líquido, el fluido nuclear manifiesta el fenómeno de la tensión superficial, puesto que los nucleones situados en la superficie son empujados hacia dentro por las fuerzas cohesivas de otros núcleos, tendiendo de este modo a reducir el área de la superficie al mínimo. Pero,

[29] Barn, en inglés, significa "granero, henil, pajar". (N. del T.)

precisamente en el caso de la densidad, la tensión superficial del fluido nuclear es enormemente mayor que la de los fluidos ordinarios. Si hacemos una película de jabón en un marco formado por un alambre en forma de U y un trozo de alambre recto a su través, la fuerza de la tensión superficial que actúa sobre el alambre móvil podría soportar el peso de unos 70 mg por centímetro de su longitud. Si pudiéramos hacer lo mismo con el fluido nuclear, la fuerza seria de diez mil millones de toneladas. A causa de la tensión superficial, los núcleos atómicos tienen una forma casi esférica, como las gotas de lluvia, y las vibraciones y rotaciones de estas pequeñas gotas deben ser las responsables de la emisión de los rayos gamma por los núcleos excitados.

El físico de Princeton John Wheeler ha demostrado, sin embargo, que el fluido nuclear puede no existir necesariamente en la forma de pequeñas esferas, sino que en principio, puede adoptar diferentes formas. La cuestión es que en este caso, aparte de las fuerzas de cohesión nuclear, también existen las fuerzas repulsivas de Coulomb entre las cargas positivas de los protones. Wheeler ha demostrado en un trabajo no publicado que la existencia de estas fuerzas repulsivas permite al fluido atómico adoptar la forma de un buñuelo. De hecho, en este caso, las fuerzas de tensión superficial que tienden a contraer el buñuelo en una esfera serán contrariadas por la repulsión eléctrica entre los lados opuestos de aquél, y toda la configuración será perfectamente estable. Tales núcleos en forma de buñuelo, que serían mucho mayores que los de uranio, con un peso atómico de muchos miles, estarán rodeados por electrones que se moverían cerca de su superficie siguiendo trayectorias semejantes al enrollado de un electromagneto circular. Tales núcleos en buñuelo no existen en la naturaleza y no es creíble que puedan ser fabricados en el futuro por los físicos nucleares más hábiles. Pero si pudieran ser hechos, apunta Wheeler, se podrían emplear como enlaces para hacer largas cadenas. El hilo hecho con estas cadenas nucleares sería sumamente fuerte, y aun siendo tan delgado como una telaraña sostendría el peso de un buque de guerra. Pero también sería muy pesado, y una yarda pesaría unas 1.000 toneladas.

No parece que los núcleos en buñuelo de Wheeler tengan aplicación práctica, pero las formas nucleares más sencillas regidas por los dos mismos géneros de fuerzas nos abrieron la edad de la energía atómica. Consideremos el equilibrio entre la

tensión superficial y la energía eléctrica de un núcleo atómico. La energía superficial total es, naturalmente, proporcional a la superficie y aumenta cuando los núcleos son mayores. Como la densidad de fluido nuclear permanece constante, su volumen es proporcional a su masa (peso atómico) y su radio a la raíz cúbica de la masa. Así pues, la energía superficial total, al ser proporcional a la superficie aumenta como el cuadrado de la raíz cúbica de la masa o, en otras palabras, como la masa en dos tercios de energía. Para calcular la energía Coulomb hemos de emplear una ley de la electrostática, que declara que la energía de un cuerpo esférico cargado es directamente proporcional al cuadrado de su carga e inversamente proporcional a su radio. La carga eléctrica nuclear está dada por su número atómico, que es aproximadamente proporcional al peso atómico. Recordando que el radio varía como la raíz cúbica del peso atómico, vemos que la energía Coulomb aumenta aproximadamente como el peso atómico en la energía 1 2/3. Este es un aumento mucho más rápido que el de la energía de la tensión superficial y concluimos que, mientras en los núcleos ligeros las fuerzas de repulsión eléctrica pueden desempeñar un papel secundario, serían absolutamente importantes en los núcleos pesados. Como las fuerzas de tensión superficial tienden a mantener las gotas de líquido y fusionar dos gotas que entran en contacto en una sola mayor podemos esperar que, en el caso de los elementos ligeros será liberada energía en los procesos de fusión` nuclear. Por otra parte, en el caso de núcleos pesados, las fuerzas disruptivas de Coulomb serían las dominantes y la fisión nuclear seria un proceso liberador de energía. Los cálculos demuestran que la "región de fusión" abarca un tercio del sistema de Mendeleiev, siendo la esperada liberación de energía cada vez más pequeña cuando más nos aproximamos al límite. La "región de fisión", que comienza en este punto corresponde a una liberación bastante baja de energía que aumenta rápidamente, alcanzando sus valores más elevados para los elementos más pesados. Así pues, cada elemento químico representa una fuente potencial de energía nuclear y la cuestión es sólo iniciar las reacciones nucleares y mantenerlas en marcha.

El modelo de gota líquida para los núcleos atómicos representa una gran aproximación a la realidad, pero no se debe olvidar que los protones y neutrones, dentro del núcleo, están sujetos a las mismas leyes cuánticas que los electrones en

el átomo, que deben producir algunas desviaciones en la concepción simplificada expuesta. Y, en efecto, estas desviaciones fueron encontradas cuando se estudiaron detalladamente las propiedades nucleares. La Figura 53 muestra los cambios de la energía cohesiva por nucleón para toda la serie desde los núcleos más ligeros a los más pesados. Se observa una disminución regular de la energía cohesiva de la primera parte de la serie y un aumento lento más tarde; esto corresponde a las regiones de fusión y fisión. Pero también se observa que la curva no es completamente suave, sino que hay cierto número de ensortijamientos que indican cohesiones anormalmente fuertes entre los núcleos.

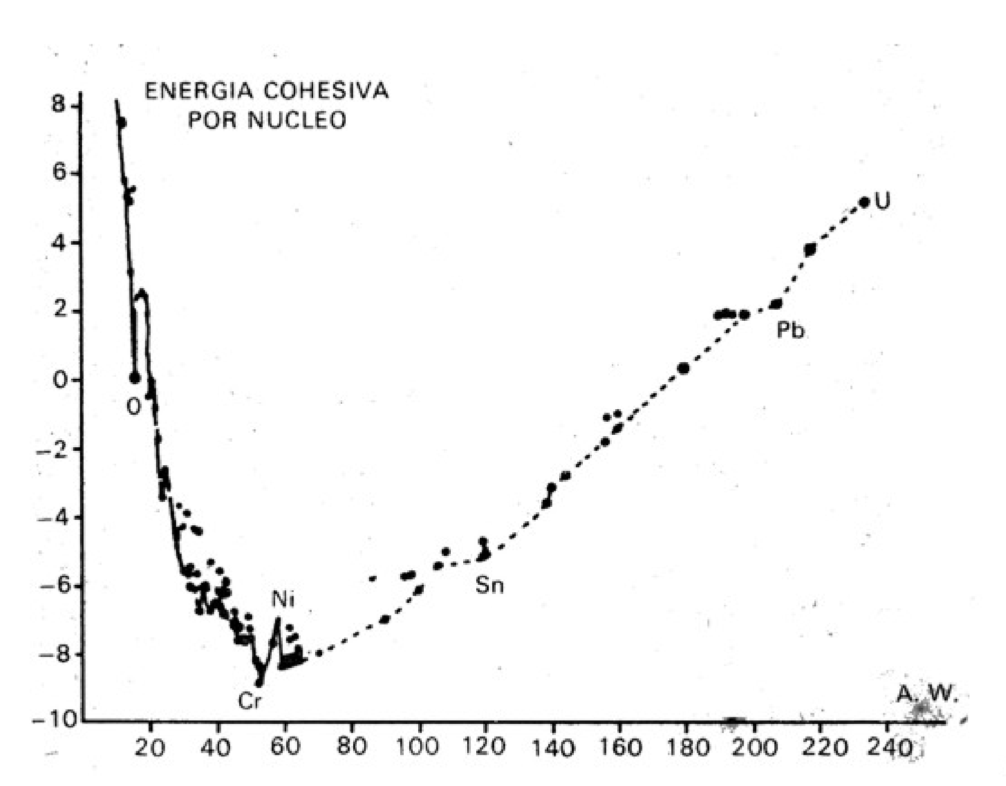


Figura 53. Energía de cohesión por núcleo como función del peso atómico.

Estos lugares corresponden a las capas completas de nucleones dentro del núcleo y son completamente análogas a las capas completas de electrones en los átomos. En el caso de los átomos, los elementos con capas completas de electrones (los gases nobles) son químicamente inertes, puesto que están completamente "satisfechas" con sus surtidos de electrones. Un efecto similar en el caso de los núcleos se muestra en la Figura 54 que representa las posibilidades relativas de que un neutrón incidente sea capturado por los núcleos de los diferentes elementos. Para

ciertos números de neutrones ya presentes en el núcleo (50, 82, 126), la probabilidad de capturar otro electrón disminuye rápidamente, indicando que estos núcleos ya contienen las capas completas de neutrones. El estudio de estas y otras muchas irregularidades de las propiedades nucleares llevan a la conclusión de que las capas internas fuertemente enlatadas están formadas en los núcleos siempre que el número de neutrones o protones es igual a uno de los siguientes números: 2, 8, 14, 20, 28, 50, 82 y 126. Debe decirse, sin embargo, que mientras en los átomos cada nueva capa de electrones está situada esencialmente fuera de la anterior, constituyendo una estructura como la de una cebolla, las capas de neutrones y protones en los núcleos se interpenetrará unas en otras, ocupando cada una de ellas todo el volumen nuclear.

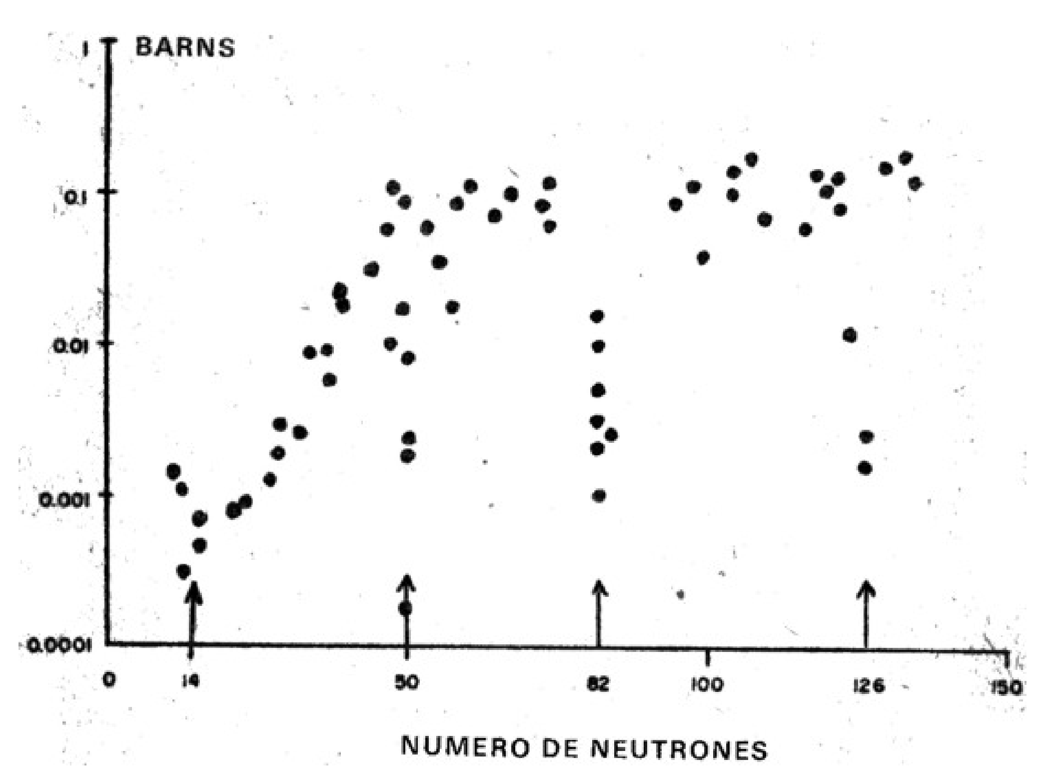


Figura 54. "Sección transversal de captura" de neutrones como función del número de neutrones en el núcleo.

Esta falta de diferenciación geométrica entre las capas nucleónicas hace su efecto menos pronunciado y más difícil de estudiar y explicar. Esta dificultad fue, sin embargo, superada simultánea e independientemente por María Goepert Meyer en Chicago y Hans Jensen en Heidelberg, que pudieron construir un sistema completo

de capas nucleares, de completo acuerdo con los hechos observados. Cuando se reunieron para comparar sus resultado descubrieron que los dos habían nacido el mismo día del mismo ano y se hicieron grandes amigos.

10. Reacciones de fisión en cadena

El 27 de enero de 1939 se reunió en Washington una pequeña conferencia de física teórica organizada conjuntamente por la George Washington University (donde el autor estaba enseñando por entonces) y la Institución Carnegie, de Washington. En ese día, Niels Bohr, que era uno de los visitantes, recibió una carta de la física alemana Lise Meitner, que en aquel tiempo había abandonado Alemania (a causa de Hitler) y trabajaba en Estocolmo. En ella decía que había recibido una carta de su anterior compañero en Berlín, Otto Hahn, dándole cuenta de que él y su ayudante, Fritz Strassmann, bombardeando uranio con neutrones, habían encontrado la presencia del bario, un elemento que está a la mitad del sistema Mendeleiev. Meitner y su sobrino, Otto Firsch (dos Otto en el asunto), que había ido con ella a Estocolmo, pensaron que ello había sido el resultado de una fisión, es decir, de la desintegración en dos de un núcleo de uranio golpeado por un neutrón. Tan pronto como Bohr leyó la carta, la discusión se desvió del tema relativamente poco incitante de la conferencia para dar paso a un vivo debate sobre si la fisión del núcleo de uranio podía llevar a una liberación de energía nuclear en gran escala. Enrico Fermi, que también participaba en la conferencia, subió a la pizarra y escribió algunas fórmulas relativas a los procesos de fisión. El corresponsal de un periódico de Washington, que había estado dormitando anteriormente, despertó y comenzó a tomar notas, pero Merle Tuve, un físico nuclear de la Institución Carnegie, le señaló inmediatamente la puerta, diciéndole que la discusión era demasiado técnica para él. Este fue el primer paso en las normas de seguridad que fueron impuestas inmediatamente sobre el desarrollo de la "energía atómica". Pero lo que el periodista había oído antes de ser despedido salió en los periódicos, y a la mañana siguiente: el autor de este libro fue despertado por una llamada telefónica de Robert Oppenheimer desde California, que deseaba conocer qué había sucedido. Y así comenzaron las cosas.

El artículo sobre la teoría de la fisión nuclear por Niels Bohr y John Wheeler, aparecido en el número de septiembre de 1939 de la Physical Review, que fue el primero y el último sobre la cuestión, publicado antes de que se corriera el telón de seguridad, estaba basado en el modelo de gota del núcleo antes expuesto. Cuando el núcleo, alcanzado por el neutrón incidente, comienza a vibrar, pasando a través de una serie de formas alargadas, queda perturbado el equilibrio entre la tensión superficial y las fuerzas eléctricas; la primera trata de volver el núcleo a su forma esférica original mientras las últimas tratan de aumentar el alargamiento. Si la relación del eje mayor del elipsoide al menor pasa de cierto límite, se desarrolla una hendidura a lo largo del plano ecuatorial y el núcleo se rompe limpiamente en dos mitades. Pronto se vio que la fisión del núcleo de uranio va acompañada por la expulsión de un par (más exactamente 2,5) neutrones que, a su vez, pueden herir a dos de los núcleos contiguos y desintegrarlos también. Esto produciría cuatro nuevos neutrones que podían romper otros cuatro núcleos... Así se puede desarrollar una reacción en cadena que abarca rápidamente a todo el trozo de uranio con el desprendimiento de unas cantidades tremendas de energía nuclear.

Es difícil escribir sobre el tema de lo que se conoce comúnmente como "energía atómica". En los primeros días, cuando la mayoría de los hechos estaban ocultos tras un espeso telón de seguridad, no se podía escribir mucho sobre ello. Pero ahora, cuando se puede encontrar cada vez más información en numerosos libros y en artículos de revistas y periódicos, el tema se ha hecho insípido y trivial. Además, aunque la fisión del núcleo de uranio puede ser considerada como un capítulo muy interesante (pero sólo capitulo) en la historia de la física, el desarrollo de las bombas atómicas, reactores y fertilizadores pertenece más bien al campo de la tecnología. Así pues, nos limitaremos en esta sección a los pasos más esenciales.

Primero, fue un hecho decepcionante, que se observó inmediatamente después de la citada conferencia, de que no es el principal isótopo de uranio el que muestra el fenómeno de fisión, sino el escasísimo isótopo U^{235} que únicamente está presente en la proporción de 0,7 %. Además, el isótopo principal U^{238}, que forma el restante 99,3 % del uranio natural no es una sustancia inocua, sino que tiene un enorme apetito por los neutrones y los captura en tal proporción que ahoga cualquiera reacción en cadena que pudiera iniciarse en el U^{235}. No había más que dos caminos

para tratar la situación: o separar el U^{235} del nocivo U^{238} o intentar *by some odds and ends* de producir la reacción en el uranio natural tratando de mantener el voraz U^{238} lejos de su presa:

Se ensayaron los dos métodos. En una planta secreta de Oak Ridge, Tennessee, se investigaron varios métodos de separación de los isótopos del uranio y, finalmente, se centró la producción en el método de difusión fundado en el hecho de que los compuestos de uranio que contienen el isótopo ligero se difunden algo más rápidamente a través de las membranas porosas que los que contienen el isótopo pesado.

Los ardides necesarios para producir la reacción en el uranio natural fueron ideados en su mayor parte por Enrico Fermi y estaban basados en el principio de "moderación". Se observó que el isótopo pesado del uranio tenía un gran apetito para los neutrones que se mueven con relativa rapidez, mientras que el isótopo ligero prefiere los neutrones muy lentos. Como los neutrones emitidos por la fisión del núcleo de uranio tienen velocidades muy altas, se ha de rebajar su velocidad al nivel del apetito del U^{235} para que no sean engullidos por el U^{238}. Esto puede conseguirse mezclando el uranio natural con una gran cantidad del llamado "moderador", es decir, un elemento cuyos átomos, carentes en absoluto del apetito para los neutrones, tomen una parte de la energía cinética del neutrón en el proceso de colisión. Los dos moderadores más eficaces resultaron ser los átomos de deuterio (isótopo pesado del hidrógeno) y los átomos de carbono que determinaron los dos tipos de pilas (de carbono y de agua pesada) empleados ahora. La primera pila atómica que empleaba el moderador de carbono (ladrillos de grafito) y fue construida bajo la supervisión de Enrico Fermi bajo la tribuna principal del estadio de la Universidad de Chicago, comenzó a funcionar el 2 de diciembre de 1941. Desde luego, las reacciones nucleares en cadena en las pilas moderadas se desarrollan muy lentamente y no pueden ser empleadas para finalidades militares o pacificas. Pero ¡hay un truco! Mientras se produce una reacción de fisión en cadena entre los núcleos del U^{235}, algunos de los neutrones son engullidos por los núcleos del hambriento U^{238} que, por virtud del moderador, se ve privado del festín de Lúculo. Lo que ocurre cuando los núcleos de U^{238} engullen un neutrón está dado por la siguiente ecuación alquimista:

$$_{92}U^{238} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{92}U^{239} + \gamma$$

$$_{92}U^{239} \rightarrow {}_{13}Np^{239} + e^-$$

$$_{92}Np^{239} \rightarrow {}_{94}Pu^{239} + e^-$$

Np y Pu significan el neptunio y el plutonio, los dos elementos "transuranios" producidos en la pila atómica. Mientras el neptunio es un estadio transitorio en el proceso, el plutonio es algo realmente importante. Posee las mismas propiedades que el U^{235} sólo que más acentuadas. Se desintegra más fácilmente, cuando le hiere un neutrón, y su fisión va acompañada de un número mayor de neutrones secundarios. Y lo que desde luego es más importante, teniendo propiedades químicas diferentes que el uranio puede ser separado fácilmente —así dicen— del uranio restante cuando termina al proceso de combustión en la pila.

Hoy, la producción de material desintegrable en los Estados Unidos se eleva a *x* toneladas por año, contra *y* toneladas por año en la Unión Soviética.

11. Bombas de fisión y reactores

El concepto más importante en todas las discusiones relativas a las reacciones de fisión en cadena es el del tamaño crítico. Cuando se produce un proceso singular de fisión dentro de un trozo de U^{235} puro o de Pu^{239}, varios neutrones de fisión (por término medio 2,5 para el uranio y 2,9 para el plutonio) son eyectados desde el punto en que se produce la desintegración nuclear. La distancia media que un neutrón de fisión debe recorrer a través del material para encontrar otro núcleo es de unos 10 cm, de suerte que si el tamaño del trozo de uranio en cuestión es menor que esa distancia, la mayor parte de los neutrones de fisión atravesarán la superficie del trozo y saldrán de él antes de tener probabilidad de producir otra fisión y más neutrones. Así pues, no puede desarrollarse una reacción progresiva en cadena si el tamaño del trozo de uranio es demasiado pequeño. Cuanto mayores sean los trozos de uranio, encontraremos cada vez más neutrones de fisión producidos en el interior, los cuales tendrán mayor probabilidad de producir otra fisión al chocar con un núcleo antes de escapar a través de la superficie, y para trozos del tamaño idóneo el número de neutrones de fisión que producen otra fisión

dentro del trozo de uranio será bastante grande para hacer que el ritmo de la reacción aumente rápidamente en el tiempo. El tamaño de un trozo de una materia desintegrable dada para el cual el porcentaje de neutrones que dan lugar a procesos subsecuentes de fisión es bastante alto para asegurar una reacción progresiva en cadena se llama el tamaño crítico de ese material particular. Como el número de neutrones por fisión es mayor en el caso del plutonio que en el caso del U^{235}, el tamaño crítico de los trozos de plutonio es menor que el de los de U^{235}, a causa de que el primero puede permitir mayores pérdidas de neutrones a través de su superficie.

Para producir una explosión nuclear debe construirse un trozo supercrítico de material desintegrable dentro de un período de tiempo que sea bastante corto para no permitir que se desarrolle la reacción en cadena con alguna fuerza considerable. Puede hacerse, por ejemplo, por disparar y unir una masa subcrítica a otra masa subcrítica con la suficiente elevada velocidad de modo que la reacción en cadena no se desarrolle en un grado apreciable hasta que se realice la plena unión de los dos trozos. Pero hay también métodos más ingeniosos (aunque secretos) de obtener el mismo resultado.

Si se desea producir una reacción de fisión en cadena bajo condiciones controladas para emplearla en la producción de energía, el fragmento debe ser mantenido todo el tiempo lo más cerca posible del tamaño crítico. Debe tenerse en cuenta que una reacción nuclear en cadena es, por su naturaleza, una reacción explosiva y que todo intento de mantenerla a un ritmo constante es comparable a mantener la combustión de una caldera usando TNT como combustible. Pero, de hecho, puede ser realizado con muy pequeña probabilidad de accidente. Puede conseguirse usando "varillas o barras de control" que contengan sustancias que absorban los neutrones (tal como el boro) que son introducidas o sacadas automáticamente de estrechos canales perforados a través del material desintegrable empleado en la reacción tan pronto como la proporción de la producción de neutrones disminuya o exceda del nivel deseado.

Hoy, los reactores nucleares están siendo empleados con éxito como fábricas de energía en los países que tienen escasez de carbón y petróleo como Inglaterra y

para la propulsión de buques como los submarinos "atómicos" de los Estados Unidos y los rompehielos "atómicos" de la Unión Soviética.

12. Reacciones termonucleares

Desde hace siglos los astrónomos y los físicos se han estado preguntando qué es lo que hace brillar al Sol y a todas las demás estrellas. Es evidente que una combustión corriente no sería suficiente, aun en el caso de que el material del Sol fuera la mejor gasolina de aviación, puesto que no podría durar desde la época de las pirámides egipcias hasta nuestros días. Hace unos cien años, Herman von Helmholtz en Alemania y Lord Kelvin en Inglaterra sugirieron que el Sol podía mantener su radiación de calor y luz como resultado de una lenta contracción de su volumen. Los cálculos han demostrado que la contracción del Sol, a partir de su gran tamaño originario hasta su presente diámetro, desprendería bastante energía para mantener su radiación durante unos cuantos cientos de millones de años. Pero las estimaciones más recientes sobre la edad del sistema solar han evidenciado que aun esta enorme cifra no es bastante grande y que el Sol debe de estar brillando desde hace miles de millones de años, por lo menos. La única manera de explicar la longevidad del Sol era suponer que su energía se deriva de algún género de transformación nuclear y en el año 1929 un astrónomo inglés, Robert Atkinson, y un físico austríaco, Fritz Houtermans, unieron sus cerebros para ver si esto podía ser verdad. Su idea era que las colisiones térmicas entre los átomos en el caliente interior del Sol podían inducir algunas reacciones nucleares bastante rápidas para suministrar la necesaria cantidad de energía. Los estudios de un astrónomo inglés, Sir Arthur Eddington, han demostrado que la temperatura en el interior del Sol debe ser tan elevada como 20 millones de grados, que corresponde a la energía del movimiento térmico de aproximadamente 4×10^{-9} ergios por partícula. Esta energía es varios cientos de veces más pequeña que la energía de los proyectiles atómicos empleados en los experimentos convencionales sobre la transformación artificial de los elementos, pero ha de tenerse en cuenta que, mientras los proyectiles nucleares acelerados artificialmente pierden rápidamente su energía inicial y tienen solo una pequeña probabilidad de alcanzar el blanco de un núcleo antes de salirse del juego, el movimiento térmico continua indefinidamente y las partículas en él implicadas

chocan unas contra otras durante ilimitados períodos de tiempo. Mediante la teoría de la penetración mecánica de las ondas a través de las barreras potenciales nucleares, que había sido desarrollada solo un año antes, Houtermans y Atkinson pudieron demostrar que, a las temperaturas y densidades existentes en el interior de Sol, las reacciones termonucleares entre los núcleos de hidrógeno (protones) y los núcleos de otros elementos ligeros pueden liberar una cantidad de energía suficiente para explicar la radiación observada en el Sol. Esta teoría fue propuesta antes de los experimentos de Cockcroft y Walton sobre la transformación artificial de los elementos originada por los bombardeos con protones y solo se disponía de muy pocos datos sobre lo que ocurre cuando diferentes núcleos ligeros son alcanzados por protones. Houtermans y Atkinson expusieron entonces que debía haber algunos núcleos ligeros que tenían la propiedad de capturar protones y retenerlos durante un considerable período de tiempo. Después de haber sido capturado el cuarto protón, se formaría una partícula a dentro del núcleo "trampa de protones" y su expulsión liberaría una gran cantidad de energía nuclear. Ellos titularon enigmáticamente su artículo, publicado en 1929 en la revista ale-mana Zeitschrift für Physick: *"¿Cómo se puede cocer un núcleo de helio en un pote potencial?"*, pero el título fue sustituido por otro más corriente por el director de la revista que no tenía sentido del humor.

Unos diez años más tarde, cuando se había reunido suficiente información sobre la transformación de los núcleos ligeros golpeados por un protón, el "núcleo cepo de protones" de Atkinson y Houtermans fue identificado como el de carbono. Hans Behte, en los Estados Unidos, y Carl von Weizsäcker, en Alemania, propusieron, independientemente uno de otro, el llamado ciclo del carbono, mostrado en la Figura 55. En esta serie de reacciones nucleares, cuatro protones son capturados consecutivamente por el núcleo del átomo de carbono y, después de la transformación de dos de ellos en neutrones, son emitidos como una partícula a. El período total del ciclo es de 6 millones de años, y la energía liberada en él se eleva a $4 \cdot 10^{-5}$ ergios.

Como, según los datos actuales sobre la composición química del Sol, cada gramo de materia solar contiene 0,0001 gramos de carbono ($5 \cdot 10^{18}$ átomos de carbono), la proporción de energía liberada por el ciclo del carbono es de 1 ergio por gramo y

segundo, lo cual constituye solamente el 1 % de la proporción a la que la energía debe ser producida en el interior del Sol.

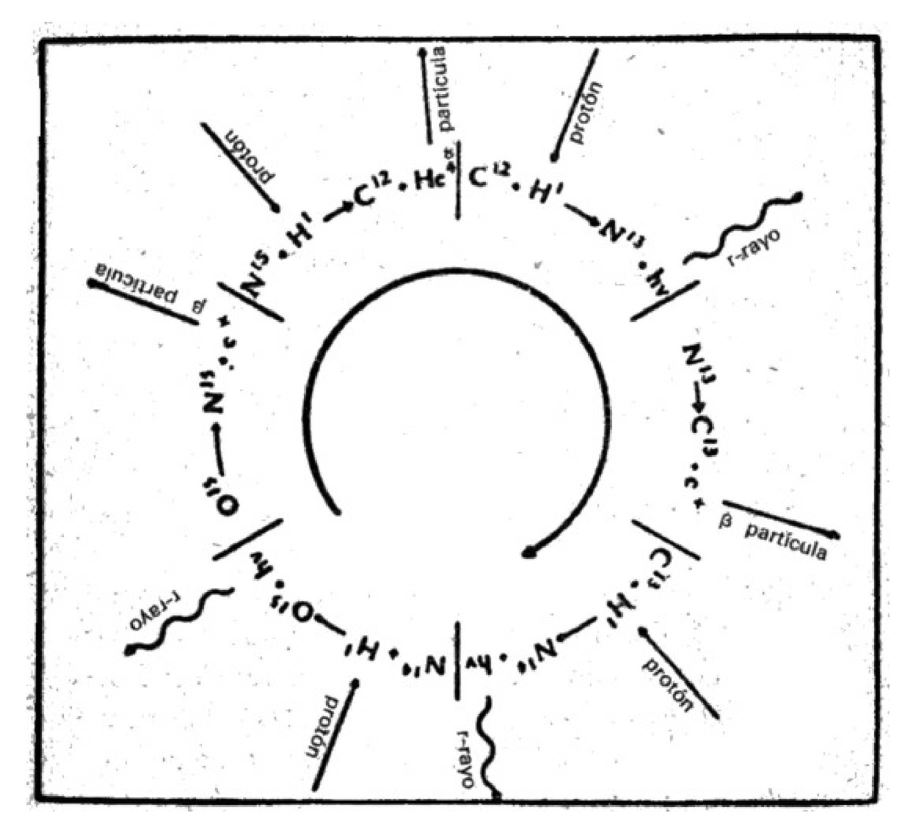


Figura 55. Ciclo de carbono responsable de la energía termonuclear en las estrellas

Otro proceso fue propuesto hacia las mismas fechas por Charles Critchfield, que era entonces un graduado en la George Washington University. Su idea era que, si en una colisión entre dos protones uno de ellos es transformado en un neutrón por la emisión de un electrón positivo, se puede formar un núcleo de deuterio (hidrógeno pesado). A través de las reacciones subsecuentes, el deuterio se transformaría en helio, llegándose al mismo final que en el ciclo del carbono, pero mucho más rápidamente. Las reacciones ampliadas en este proceso llamado H-H son:

$${}_1H^1 + {}_1H^1 \rightarrow {}_1D^2 + e^- + \gamma$$

$${}_1H^2 + {}_1H^1 \rightarrow {}_2He^3 + \gamma$$

$${}_2He^3 + {}_2He^3 \rightarrow {}_2He^4 + 2\ {}_1H^1$$

A la temperatura de 20 millones de grados, esta reacción tarda $3 \cdot 10^9$ años y libera $4 \cdot 10^{-5}$ ergios por protón. Como el hidrógeno constituye aproximadamente la mitad de la materia solar ($2 \cdot 10^{23}$ átomos por gramo), la proporción total de energía liberada es de unos 100 ergios por gramo y segundo, en completo acuerdo con el valor observado.

El predominio de la reacción H-H sobre el ciclo del carbono no es una ley general y se invierte en muchas estrellas. El quid es que estas dos series de reacciones termonucleares poseen diferente sensibilidad para la temperatura y mientras la proporción del ciclo del carbono es proporcional a T^{17}, la reacción H-H lo es únicamente a T^4. Así en el caso de las estrellas más brillantes que el Sol, como Sirio, que posee temperaturas centrales más altas, el ciclo del carbono predomina sobre la reacción H-H. Por otra parte, en las estrellas más débiles que el Sol —y la mayoría de las estrellas pertenecen a esta clase— la producción de energía se debe enteramente a la reacción H-H.

El lector se quedaría muy sorprendido si tratase de comparar la cantidad de producción de energía dentro del Sol con la cantidad de calor producido en un aparato eléctrico corriente, como una cafetera eléctrica. Cien ergios por gramo y segundo es equivalente a unas $2 \cdot 10^9$ calorías por gramo y segundo y se tardaría $5 \cdot 10^7$ segundos, o sea, un año y medio en elevar 1 gramo de agua fría al punto de ebullición a esa proporción de calor suministrado. Así pues, empleando una cafetera eléctrica en la cual la unidad térmica actuase con la misma eficiencia que las reacciones termonucleares dentro del Sol, tendríamos que esperar años hasta que hirviera el agua, siempre, naturalmente, que la cafetera esté perfectamente aislada y no se produzcan pérdidas de calor. La razón de por qué el Sol esté tan caliente a pesar de tan miserable cantidad de calor, es que es tan grande.

En efecto, como la producción total de calor es proporcional al volumen (es decir, al cubo del radio), mientras las pérdidas de calor son proporcionales a su superficie (es decir, al cuadrado del radio), los cuerpos muy grandes son muy calientes, aunque la producción de calor por unidad de volumen en su interior sea muy pequeña.

Resulta evidente de la exposición anterior que ni el ciclo del carbono ni la reacción H-H, que suministran la energía para las estrellas que iluminan nuestro universo,

son adecuadas para el ambicioso *Homo sapiens* que desea emplear la energía nuclear pan sus propios designios.

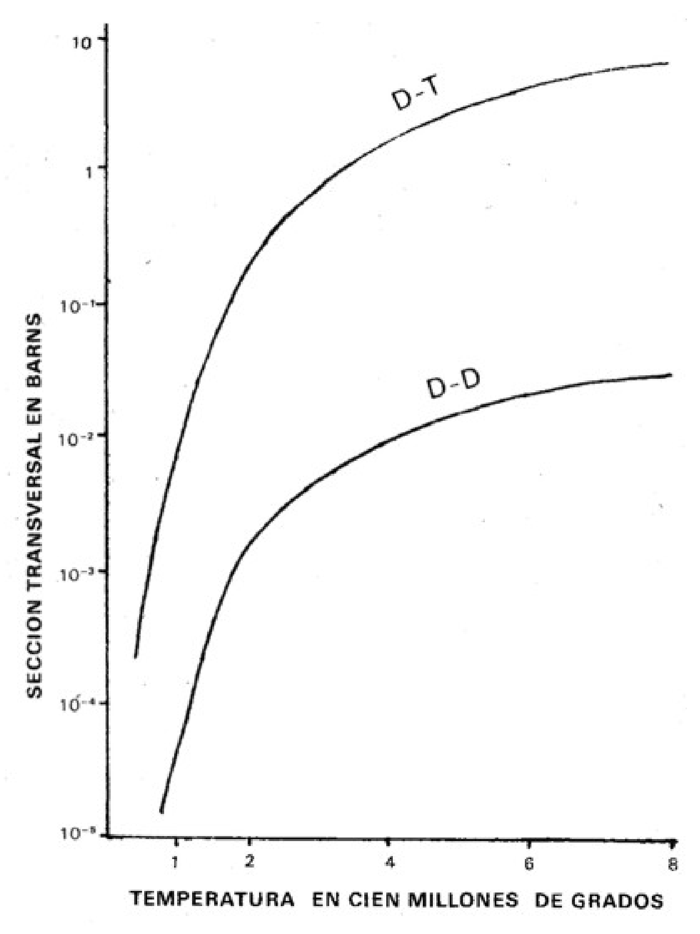


Figura 56. Secciones transversales para las reacciones D-D y D-T corno función de su energía térmica expresada en términos de temperatura absoluta.

La clave para la solución de este problema está dada por el isótopo pesado del hidrógeno, deuterio D^2 descubierto por el químico americano Harold Urey, y el isótopo aun más pesado, tritio, T3. El deuterio existe en la Naturaleza, aunque en cantidades bastante pequeñas, y sólo una de cada tres mil moléculas de agua contiene un átomo de deuterio. Gracias al desarrollo de los métodos para la separación de los isótopos, el coste del deuterio descendió del precio de los caros perfumes franceses al del whisky barato, y hay una cantidad enorme de agua en los océanos. El tritio, por ser un isótopo inestable no existe en la Naturaleza (excepto en cantidades insignificantes producidas en la atmósfera por los rayos cósmicos) y

tiene que ser manufacturado a coste elevado en las pilas atómicas. Es demasiado caro para ser empleado como combustible principal, pero ayuda como "incitador nuclear" para iniciar la reacción termonuclear en el deuterio.
Las posibles reacciones entre los isótopos pesados del hidrógeno son las siguientes:

$$_1D^2 + {_1D^2} \rightarrow {_2He^3} + {_0n^1} + 3{,}25 \text{ mev}$$

$$_1D^2 + {_1D^2} \rightarrow {_1T^3} + {_1H^1} + 4 \text{ mev}$$

$$_1D^2 + {_1T^3} \rightarrow {_2He^4} + {_0n^1} + 17{,}6 \text{ mev}$$

y su sección transversal efectiva, calculada sobre la base de la teoría del efecto del túnel, se muestra gráficamente en la Figura 56. Así pues, todo lo que hay que hacer para producir reacciones termonucleares entre los isótopos pesados de hidrógeno es calentarlos a una temperatura de unos cientos de millones de grados. Esto fue conseguido por los científicos de Los Álamos en 1 de noviembre de 1952 cuando hicieron explotar la primera bomba termonuclear en Elugelab, una isla coralina del océano Pacífico, convirtiéndola en una balsa de agua de una milla de anchura y unos 200 pies de profundidad. Este resultado fue conseguido comprimiendo y calentando una adecuada cantidad de hidrógeno pesado mediante una potente explosión de una bomba de fisión.
Pero la situación se hace mucho más complicada si se desea producir reacciones termonucleares bajo condiciones controladas y usar la energía liberada para finalidades constructivas más bien que destructoras. Es evidente que, en este caso, las condiciones físicas bajo las cuales las reacciones termonucleares se desarrollan tienen que ser modificadas radicalmente. Ante todo, la reacción debe producirse a densidades sumamente bajas para evitar la insoportable alta presión del gas que se desarrollaría a la temperatura de varios cientos de millones de grados.
En efecto, a esta temperatura y a la densidad del aire atmosférico, el gas deuterio desarrollaría la presión de unos 100 millones de libras por pulgada y no habría vasija que pudiera contenerlo. El gráfico de la Figura 57 muestra el valor de la producción termonuclear de energía para el deuterio puro y la mezcla de deuterio y tritio a las diferentes densidades del gas. En el vemos que, para obtener una producción de energía de unos cien vatios por cc, lo que es comparable con la de los

actuales reactores de fisión, la densidad del deuterio puede ser tan baja como una milésima de la densidad del aire atmosférico que corresponde al vacío mayor que puede ser producido en nuestros laboratorios.

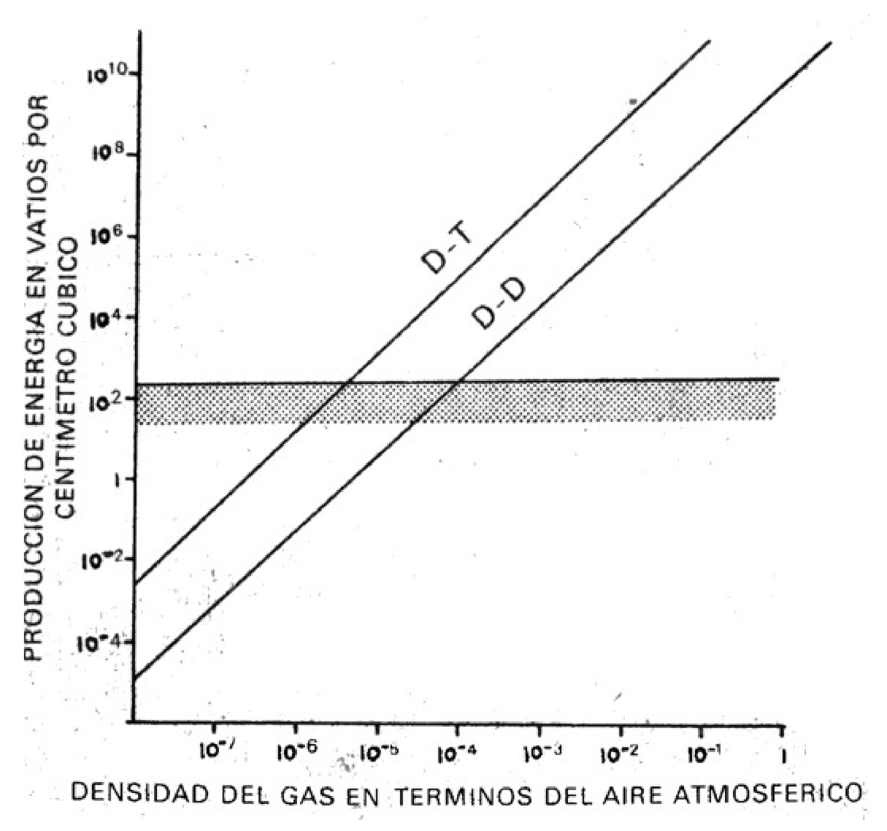


Figura 57. La proporción de liberación de energía nuclear por la variante densidad del gas a la temperatura de $7 \cdot 10^{90}$ *K (unas dos veces la temperatura interior del Sol). La faja sombreada representa la producción de energía en el uranio y plutonio de los reactores.*

El segundo problema es mantener este caliente gas rarificado lejos de las paredes de la vasija, puesto que en otro caso el proceso de conducción del calor en las paredes rebajaría rápidamente la temperatura del gas deuterio por debajo del valor mínimo requerido para la reacción termonuclear.

Esto último puede ser conseguido por varios procedimientos distintos, todos ellos fundados en el empleo de potentes campos magnéticos. A las elevadísimas temperaturas exigidas en este caso, el gas deuterio en el tubo estará completamente ionizado y estará compuesto por completo de electrones cargados negativamente y deuterones cargados positivamente. (Este estado de la materia se

designa actualmente con el nombre de "plasma") Sabemos que cuando una partícula cargada de electricidad se mueve a través de un campo magnético experimenta una fuerza perpendicular a la dirección de su movimiento y a la del campo.

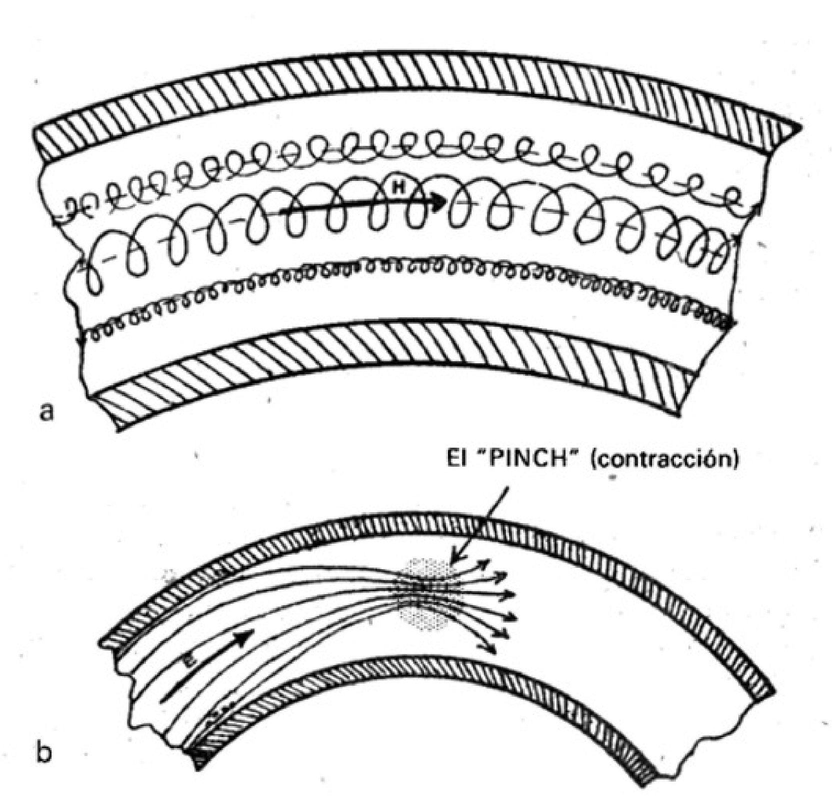


Figura 58. Dos métodos principales que se están desarrollando actualmente para controlar las reacciones termonucleares. "Stellarator" en Princeton y "Perhapsotron" en Los Álamos.

Esta fuerza le obliga a moverse en espiral a lo largo de la dirección de las líneas magnéticas, como se ve en la Figura 58 a. De esta suerte, al formarse un potente campo axial en el tubo, podemos evitar efectivamente que los deuterones y tritones libres se acerquen a las paredes. Si se puede conseguir esto, las colisiones entre las partículas que se mueven en espiral a lo largo del tubo puede esperarse que se traduzcan en reacciones D-D o D-T con desprendimiento de energía nuclear y de grandes cantidades de neutrones. Desde luego, para que comience este proceso el gas del tubo debe haberse calentado a una temperatura muy elevada por medio de algún agente exterior.

La segunda posibilidad consiste en emplear fuerzas magnéticas originadas por descargas eléctricas, cortas pero potentes, a través del tubo. Es sabido que dos corrientes eléctricas paralelas que siguen la misma dirección se atraen magnéticamente una a otra, de suerte que si la corriente es bastante fuerte, el gas (o más bien el plasma) dentro del tubo tiende a separarse de las paredes y apretujarse formando un chorro estrecho a lo largo del eje. El modo como este efecto de contracción (efecto Pinch) funciona puede comprenderse a la vista de la Figura 58 b. Al contrario que en el método antes descrito, este efecto de contracción opera a saltos como lo hace el motor de un automóvil, pero tiene la ventaja de que el gas del tubo es calentado automáticamente por la descarga eléctrica y no necesita calentamiento exterior. Se ha calculado que una corriente de varios cientos de miles de amperios que dura unos cuantos microsegundos produciría una contracción bastante fuerte para producir una reacción termonuclear en el deuterio. El trabajo en las dos direcciones expuestas se realiza actualmente en muchos laboratorios del mundo y es muy posible que el problema de una reacción termonuclear controlada será resuelto en poco tiempo.

13. Mesones e hiperiones

Al principio de los años treinta, los físicos no tenían que habérselas más que con unas cuantas partículas de las que está compuesta la materia. Protones y neutrones en los núcleos atómicos, electrones en sus envolturas y —¡ah, también!— los neutrinos, el problema nacido en este período. Pero en 1932 apareció un artículo del físico japonés Hidekei Yukawa, que fue la pesadilla para todos los interesados en la naturaleza de las fuerzas cohesivas nucleares. Yukawa sugirió que estas fuerzas son debidas a una nueva partícula que se cambia continuamente entre los protones y los neutrones. Es muy difícil, si no imposible, describir de un modo sencillo la complicada noción del "canje de fuerzas". Probablemente la mejor manera de explicarlo es imaginar dos perros hambrientos que se disputan la posesión de un hueso suculento y están arrebatándoselo uno a otro para darle un mordisco. El sabroso hueso pasa continuamente de los dientes de uno a los del otro, y en la lucha resultante los dos perros quedan inseparablemente juntos. La idea de Yukawa era que las fuerzas de atracción entre los nucleones son debidas a una lucha similar

por la posesión de esta nueva sabrosa partícula. Esta nueva partícula podría ser neutra eléctricamente o podría transportar una carga eléctrica positiva o negativa y el proceso de canje seria parecido en este caso al descrito entre los dos perros.

Yukawa ha demostrado que, para explicar las propiedades observadas de las fuerzas nucleares, se debe suponer que esta nueva partícula tiene una masa intermedia entre la masa de un protón y la masa de un electrón, siendo 10 veces más ligera que la primera y 200 veces más pesada que la segunda. Nadie creyó en la existencia de estas partículas, que fueron llamadas irónicamente "*yokones*", hasta que dos años después, un físico del Instituto Tecnológico de California, Carl Anderson, descubrió la presencia de partículas cargadas positiva y negativamente en los rayos cósmicos que llegan a la Tierra procedentes de las altas capas, de la atmósfera.

A partir de este descubrimiento, el nombre de la nueva partícula ha sufrido diversas transformaciones. A veces fue llamada "electrón pesado", otras "protón ligero", después alguien sugirió el nombre de "mesotrón", derivado de la palabra griega $\mu\varepsilon\sigma o\sigma$ que significa "entre". Pero el padre de Werner Heisenberg, que era profesor de lenguas clásicas, objetó que las letras "tr" no tenían por qué figurar en el nombre. En efecto, mientras el nombre "electrón" se derivó del griego *electra* (ámbar), la palabra griega *mesos* no tiene "tr". Así, con protesta de los físicos franceses, que no querían que el nombre de la nueva partícula se confundiera con *maison* ("casa" en francés), se estableció para ella el nombre de "mesón".

Desde muy al principio, los mesones fueron un quebradero de cabeza para los físicos, puesto que parecía haber algo erróneo en su absorción por el aire atmosférico. Para las partículas de una energía tan sumamente alta (muchos miles de millones de voltios eléctricos), la absorción en los diferentes materiales se esperaba que dependiera exclusivamente de la cantidad total (masa) de la materia que atraviesan. En efecto, como para estas energías todos los electrones atómicos con los cuales chocan estas rápidas partículas pueden considerarse que están libres (véase la exposición del efecto Compton), lo único que cuenta es el número de electrones y no la forma en que están unidos al núcleo. Así pues, si medimos la intensidad de un haz de rayos cósmicos en la cima de una alta montaña y en la

base, la disminución de su intensidad debe ser determinada solamente por el peso de la columna de aire que se extiende desde el lugar más bajo al más alto.

Si la diferencia de presión barométrica entre los dos lugares es, por ejemplo, de 100 mm de mercurio, significa que el peso de la columna de aire es igual al peso de una columna de mercurio de 100 mm de altura, y, por tanto, la absorción de rayos cósmicos en una capa de mercurio de 100 mm de espesor debe ser la misma que la absorción en el aire entre la cima y la base de la montaña. Esta regla funcionó exactamente en el caso de los electrones de los rayos cósmicos, pero no en el de las partículas recién descubiertas. Un experimento importante en este sentido fue realizado en 1940 por Bruno Rossi y otros en el Lago Eco (altura, 3.240 metros), cerca de la cumbre del Monte Evans, junto a Denver (altura 1.616 metros). La diferencia de presión barométrica entre los dos lugares era de 14,5 mm de mercurio, o lo que es lo mismo, 2 metros de agua. Rossi empleó dos contadores idénticos de mesones —uno en Denver y otro en la montaña, el último sumergido dos metros bajo la superficie del lago[30]. Como el agua del lago produciría en este caso la misma absorción que la capa de aire entre el lago de la montaña y las calles de Denver, se esperaba que ambos contadores dieran el mismo resultado. Sin embargo, el experimento no confirmó estas esperanzas, y el contador en Denver mostró constantemente un número mucho menor de mesones. La única explicación posible era que había otra causa distinta que la absorción atmosférica para reducir el número de mesones que llegaban al suelo. Enrico Fermi sugirió que el efecto podría ser debido a la intrínseca inestabilidad de los mesones. En efecto, si los mesones se desintegran en su viaje, la fracción que llegue al suelo dependerá del tiempo del viaje. Como los mesones que descienden hasta Denver han viajado 1.624 metros más, y como viajan prácticamente con la velocidad de la luz, el intervalo de tiempo implicado es $1,6 \cdot 10^5 / 3 \cdot 10^{10} = 5 \cdot 10^{-6}$ segundos. De esta cifra y del decrecimiento observado de intensidad al nivel del suelo, puede ser calculada la media del tiempo de vida en los mesones, que resulta depender de su velocidad. Para los mesones muy rápidos, con la energía de 250 mev, el tiempo de vida fue de unos $2 \cdot 10^{-3}$ segundos, mientras que para los lentos con sólo una energía de 100 mev, fue observado un tiempo de vida de sólo $5 \cdot 10^{-4}$. Estas observaciones dieron la

---

[30] En el experimento se empleó una plancha de hierro con un espesor equivalente a dos metros de agua, pero sería más poético emplear el agua del hermoso lago.

primera confirmación experimental de la dilatación einsteiniana del tiempo y los resultados experimentales se ajustaban muy bien a la fórmula

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

En los experimentos subsecuentes se pudo medir el tiempo de vida de los mesones después de haberse quedado en reposo en un trozo de material absorbente y se encontró que era tan corto como $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ segundos. Si los mesones rápidos de los rayos cósmicos tuvieran este tiempo de vida se habrían degradado ya a gran altura en la atmósfera y no podríamos observarlos nunca en el suelo.

¿Qué ocurre a un mesón que muere? Esto no se puede responder más que fotografiando la trayectoria de un mesón y los productos de su degradación. En el caso de partículas de alto poder de penetración como los mesones no es necesario usar cámaras de niebla, que en todo caso son demasiado voluminosas para elevarlas en globos o cohetes. El método tipo en estos estudios está fundado en el empleo de placas fotográficas con capas espesas de emulsión. Se colocan varias de estas placas en pila y cuando una partícula de alta energía pasa a través de esta pila, afecta a los granos sensibles de la emulsión fotográfica que encuentra en su camino. Examinando las placas, una vez reveladas, al microscopio se observan largas hileras de granos oscurecidos que indican el camino que ha seguido la partícula. La penúltima (que va desde el pie hasta arriba, a la izquierda) pertenece a un mesón, un hecho que puede ser establecido contando el número de granos fotográficos afectados por unidad de longitud de huella. La última huella (que va desde la parte superior a la inferior, a la izquierda) pertenece a un electrón ordinario producido en el punto donde termina la huella del mesón. El hecho de que el electrón sea expelido en la dirección contraria prueba que debe haber una o más partículas participando en el proceso de degradación y moviéndose a la izquierda. El hecho de que no se vea otra huella prueba que esas partículas deben ser eléctricamente neutras y el estudio detallado de las direcciones y las energías implicadas lleva a la conclusión de que hay, en efecto, otras dos partículas, las

cuales son nuestros viejos amigos los neutrinos. Así pues, la degradación de un mesón puede ser descrita por la ecuación:

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + 2\nu$$

donde ± corresponden a los mesones cargados positiva y negativamente. Como el mesón tiene 206 veces la masa de un electrón, y el electrón, naturalmente, tiene 1 masa de electrón y el neutrino prácticamente no tiene masa, quedan 205 masas de electrón sin contar. Conforme al principio einsteiniano de equivalencia de masa y energía, este exceso de masa se traduce en 100 mev de energía repartidos entre las partículas formadas en la degradación. Cuando los mesones fueron descubiertos por primera vez, fueron saludados como las partículas que, conforme a la teoría del fenómeno de canje de Yukawa, debían ser responsables de las fuerzas cohesivas que actúan entre los nucleones. Pero pronto se vio que la situación no era, en modo alguno, tan sencilla. La dificultad se suscita en conexión con la cuestión de lo que hacen los mesones cuando son retardados en sus trayectorias dentro de un espeso bloque de material absorbente. En este caso, la suerte de los mesones positivos y negativos se esperaba que fuera diferente. Los mesones positivos, al ser repelidos por los núcleos atómicos, cargados positivamente, del material del cual son retardados, vagan como parias y al cabo de unos cuantos microsegundos se degradarán en un electrón rápido positivo y un par de neutrinos. El electrón positivo de alta energía será expulsado del bloque, atravesará uno de los numerosos contadores con que los cazadores de mesones cercan el bloque y anunciará la muerte de un mesón positivo.

Por el contrario, el mesón negativo retardado será cogido en una órbita cuántica y se convertirá en un miembro temporal del sistema atómico. Los cálculos realizados por Enrico Fermi y Edward Teller han demostrado que esta captura se verifica con suma rapidez, mucho antes de que el mesón retardado tenga posibilidad de desintegrarse. Como los radios de las órbitas cuánticas de Bohr son inversamente proporcionales a la masa de la partícula, la órbita del mesón será doscientas veces menor que la órbita del electrón más interior, y el mesón capturado se moverá muy próximo a la superficie del núcleo, pareciendo algo así como un satélite de la Tierra.

Una vez en órbita, el mesón se encuentra ante dos posibilidades: puede desintegrarse en un electrón rápido negativo y dos neutrinos, y los contadores situados en torno al bloque registrarán la muerte de un mesón negativo. Pero al moverse tan cerca del núcleo puede ser engullido por éste. En efecto, si las fuerzas entre protones y neutrones son debidas al continuo canje de mesones entre ellos, debe producirse la reacción

$$P^{+} + \mu^{-} \rightarrow n^{0} + v^{0}$$

Por la energía de las fuerzas nucleares se puede calcular que tiene que ser una reacción sumamente rápida que tarda únicamente 10^{-22} segundos. Como la degradación natural del mesón dura unos 10^{-6} segundos, se sigue que prácticamente todos los mesones deben ser engullidos por el núcleo mucho antes de que mueran de muerte natural. A lo más, únicamente un mesón de 10^{16} mesones tiene una probabilidad de desintegrarse en un electrón y neutrinos antes de ser engullidos. Así pues, ningún electrón negativo debe ser expelido del bloque retardador de mesones. La prueba experimental discrepa radicalmente de esta conclusión. Aunque el número de electrones negativos expulsados del bloque era menor que el de electrones positivos, fue más pequeño que el de electrones positivos, para algún material por un factor de 2, para otros por un factor de 10, no fue ciertamente menor por un factor de 10^{16}. Esto significa que el apetito de los núcleos por los mesones es varios millones de billones menor que el necesario para una fuerza suficientemente vigorosa de canje como la que concibió Yukawa. ¿Qué se podía hacer entonces? Los mesones fueron predichos, los mesones fueron descubiertos después, pero eran clases falsas de mesones, y los núcleos atómicos no tenían por ellos más interés que los leones por el heno.

La solución vino de una fotografía con emulsión gruesa tomada en 1947 por uno de los globos que un físico inglés, C. F. Powell, enviaba a la alta atmósfera. La fotografía mostraba dos trayectorias unidas en sus extremos. Una de ellas pertenecía a un mesón ordinario con la masa 206 mientras la otra debía haber sido producida por una partícula de la misma carga pero con la masa 273. La partícula más pesada fue llamada al principio un "mesón pesado" (como "un boxeador peso

medio pesado") pero pronto se le designó como un π mesón (o "pión") mientras el "mesón ligero" descubierto primeramente recibió el nombre de μ mesón (o "muón").

Estudios posteriores han demostrado que un pión negativo o positivo se degrada en un muón (negativo o positivo) y un neutrino conforme a la ecuación:

$$\pi\pm\rightarrow \mu \pm +\nu^0$$

Son producidos en las altas lindes de la atmósfera como resultado del impacto de los rayos cósmicos primarios (que, en esencia, son protones de elevada energía) contra los núcleos atómicos, y tienen una corta media de vida ($2{,}6\cdot10^{-6}$ segundos), de suerte que, aun a pesar de la dilatación einsteiniana del tiempo, ninguno de ellos llega a la superficie de la Tierra. Mientras no hay más que dos tipos de muones: μ^+ y μ^- hay tres clases de piones, π^+, π^- y π^0 el último de los cuales se desintegra en dos cuanta de radiación de alta energía:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

con una mitad de vida de sólo 10^{-16} segundos.

Durante los años siguientes se fueron descubriendo y lloviendo sobre las cabezas de los físicos cada vez más partículas. Apareció un mesón K con la masa de 965 electrones y varias partículas más pesadas que los protones que recibieron el nombre de "hiperiones". Sus nombres, su forma de degradación y mitad de vida se consignan en la tabla adjunta y no hay garantías de que no se descubran más en el futuro próximo. Las fotografías de los sucesos elementales se están haciendo cada vez más intrincadas. Estas fotos se toman con un nuevo aparato llamado "cámara de burbujas" que es, en cierto modo, una inversión de la cámara de niebla. En lugar de gotitas líquidas formadas en un gas, se emplean en él las burbujas de gas formadas en un medio líquido como el hidrógeno líquido. Aunque nuestro conocimiento fáctico de las partículas elementales incremente rápidamente, chocamos contra un muro sólido cuando intentamos comprenderlas, y todas las

teorías desarrolladas en esta dirección son hasta ahora de carácter puramente fenomenológico.

LAS PROPIEDADES DE LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

Nombre y símbolo	Masa (en electrón masas)	Media vida (en segundos)	Esquema de degradación	Masa en términos de 137 m.
Xi; $\Xi \pm$	2585	10^{-10}	$\Lambda_0 + \pi \pm$	18.88
Sigma; $\Sigma \pm$	2330	10^{-10}	$n + \pi \pm$	17.02
Lambda; Λ^0	2182	2.7×10^{-10}	$p^+ + \pi^-$ or $n + p^+$	15.92
Neutrón; n	1838.6	10^3	$p^+ + e^- + \nu$	
Protón; p	1836.1	estable		13.40
Tauón; $\tau \pm$	966.5	10^{-8}	$\pi \pm + \pi^0 + \pi^0$, etc.	7.05
Thetón; θ^0	965	10^{-10}	$\pi^0 + \pi^0$ or $\pi^+ + \pi^-$	
Pión; $\pi \pm$	273.2	2.6×10^{-8}	$\mu \pm + \nu$	1.995
Pión; π^0	264.2	10^{-16}	2γ	1.928
Muón; $\mu \pm$	206.7	$2.2 + 10^{-6}$	$e \pm + 2\nu$	1.511
Electrón; $e \pm$	1	estable		
Neutrino; ν	0	estable		

14. A través del espejo

Si encontramos un zapato del pie izquierdo estamos seguros de que el zapato del pie derecho está en algún lado de la cama o del sofá; lo mismo puede decirse de los guantes y de otros muchos objetos. Pero todos los hombres y mujeres tienen el corazón al lado izquierdo y el apéndice en el derecho. Un hecho más fundamental de la biología es que las moléculas de proteínas que forman los seres vivientes, sea una ameba, un hombre, una sardina o un rosal, tienen una simetría zurda y que el mundo de las plantas y los animales de simetría diestra no existen en la superficie de la Tierra. Es muy extraño, puesto que no siempre que un químico orgánico sintetiza proteínas obtiene un 50% de moléculas zurdas y un 50% de moléculas diestras. Al ser indigeribles o incluso venenosas unas para otras, acaso han librado una batalla en que uno de los lados quedó completamente destruido.

Pero en la física regular siempre ha sido cumplido el principio de la simetría del espejo (conocido con el nombre de "principio de paridad) y a cualquier proceso físico se le podría encontrar otro proceso que se le pareciese exactamente como una imagen del primero vista en un espejo. En el año 1956, dos físicos chino-americanos, Chen Ning Yan y Tsung Dao Lee, sugirieron sobre la base de consideraciones teóricas que acaso eso no rigiera en el caso de partículas elementales.

Como hemos dicho antes varias vetes, las partículas elementales y los neutrones en particular pueden ser considerados como peonzas que giran en torno a su eje. Esta rotación puede ser, claro está, en el sentido en que se mueven las manecillas de un reloj o en el sentido contrario, y las dos formas de movimiento pueden ser transformadas una en otra con sólo invertir las partículas poniéndolas cabeza abajo. El electrón emitido por la degradación de un neutrón sigue preferentemente la dirección de su eje de rotación, y se creía que los electrones son emitidos con igual probabilidad en ambas direcciones, es decir, desde el polo norte o el polo sur. Si esto fuera cierto, el principio de paridad quedaría cumplido y la imagen especular del neutrón degradante sería idéntica a la primitiva, puesto que todo lo que habría que hacer para que coincidiesen es invertir la posición del neutrón. Pero si el electrón es emitido siempre en una dirección, la situación resulta diferente por completo. En efecto, mirando la imagen de un neutrón que se degrada en un espejo se vería que no hay modo de invertirla de modo que coincida con el original. Si, en ambos casos, el electrón es emitido hacia arriba, los dos neutrones giran en direcciones contrarias. Si, mentalmente, se invierte la imagen o el original, los dos electrones serían emitidos en direcciones opuestas. El principio de paridad fallaría y el comportamiento de las partículas elementales en el otro lado del espejo no sería idéntico con la que está frente a él.

Para probar la hipótesis de Yang y Lee, se realizó un experimento directo a fin de ver si existe correlación entre la dirección en que gira el neutrón y la dirección de la emisión del electrón. A este objeto se enfrió un material radiactivo que sufría una degradación beta a una temperatura muy baja y se le colocó en un potente campo magnético. En estas condiciones, cuando se extingue todo el movimiento térmico de las moléculas, todos los átomos se orientan en una sola dirección a lo largo de las

líneas magnéticas de fuerza. Si el electrón fuera emitido igualmente en las dos direcciones respecto al eje de rotación del neutrón, se observaría el mismo número de ellos moviéndose hacia los polos norte y sur del electromagneto. Pero el experimento llevó a una conclusión enteramente contraria y, como Yang y Lee habían predicho, todos los electrones se movían en la misma dirección. Poco después llegóse al mismo resultado en la degradación de un μ mesón.

Esto fue la quiebra del principio de paridad; el mundo de las partículas elementales se comprobó que está desequilibrado. ¿Dónde está la mitad suya que corresponde a la física vista a través del espejo? No lo sabemos ni lo sabremos hasta que comprendamos la naturaleza básica de las partículas elementales.

15. El futuro de la física

De lo que llevamos dicho resulta evidentemente que el futuro de la física depende de los estudios posteriores y comprensión de las partículas elementales, y mientras que el progreso experimental en esta dirección está en marcha, la teoría está prácticamente detenida. Hace veinticinco siglos, Demócrito postuló que la materia está compuesta de diminutas partículas discretas y nosotros estamos cada vez más convencidos de la exactitud de esta tesis. Hace sólo medio siglo que hemos aprendido que la energía tiene también una estructura "atómica" y ahora hablamos de cuantas de energía. En el transcurso de los seis últimos años, los físicos han aprendido la manera de cuantificar las distintas clases de energía. En el caso de la radiación electromagnética, la energía únicamente puede tomar los valores de nhv en que v es la frecuencia de vibración y n un número entero. En un sencillo átomo de hidrógeno, la energía de los diferentes estados cuánticos varia como $1/n^2$ en que n es un número entero. En otros casos más complicados la respuesta exacta está dada por las ecuaciones de Schrödinger y Dirac. Pero, en el caso de las partículas materiales, estamos todavía en un estado de absoluta ignorancia. No conocemos por qué una carga eléctrica tiene siempre el mismo valor: $4{,}77 \cdot 10^{-10}$ esu. No tenemos ni idea de por qué las masas de las partículas están cuantificadas, teniendo los valores relativos consignados en la Tabla I. Ni otra mejor que Demócrito de por qué la materia debe consistir en partículas indivisibles en lugar de ser continua.

Las respuestas a las cuestiones anteriores constituirán la física del porvenir, pero en las últimas décadas no se ha dado un solo paso para hallar esas respuestas y nadie puede predecir cuándo puede esperarse encontrarlas. Pero, aunque no se conoce una respuesta correcta, no se nos debe vituperar por especular sobre esta clase de problemas. Tomemos, por ejemplo, la carga elemental e. Es sabido que e^2 dividido por el producto de la velocidad de la luz c y la constante cuántica h es un número puro o una constante unidimensional, lo que significa que no importa que expresemos e, c y h en unidades centímetros-gramo-segundo o en unidades pulgada-libra-hora o cualquier otro sistema de unidades (siempre que sean empleadas consecuentemente); la relación siempre es la misma. La relación es conocida con el nombre de "constante de fina estructura" a causa de que resulta de la descripción de la división de las rayas de la serie Balmer en varios componentes muy pequeños y su valor numérico está dado por 1 dividido por 137. ¿Por qué 137 y no 75 ó 533? En las fórmulas físicas, los coeficientes numéricos tienen siempre algún significación matemática. Por ejemplo, si se estudia la relación entre el período T de un péndulo, su longitud l y la aceleración de la gravedad g, no importa qué unidades se empleen, siempre se llega a la fórmula:

$$T = 6{,}283\sqrt{\frac{l}{g}}$$

¿Qué es ese número 6,283? Si se trata de relacionarlo con varios números usados en matemáticas, vemos que es de hecho igual a 2π. Y en efecto, empleando las ecuaciones de la mecánica teórica para la derivación de esta fórmula, encontramos que el coeficiente *tiene que ser 2*π. Del mismo modo, derivando una expresión para la carga elemental empleando las ecuaciones de la teoría cuántica relativista que contienen las constantes c y h, llegamos a la conclusión de que la relación hc/e^2 (inversa de la constante de fina estructura) está dada por una cierta expresión matemática que es numérica-mente igual a 137. Pero nadie sabe por ahora cómo desarrollar tal teoría, y mientras no hay dificultad en ver que 6,283 es igual a 2·3,141..., es mucho más difícil ver qué clase de animal es ese número 137.

Sir Arthur Eddington, que ha hecho invaluables contribuciones a la teoría de la estructura interna de las estrellas, trató hace muchos años de explicar el número 137. Su razonamiento fue en líneas generales el siguiente: Nosotros vivimos en un mundo de cuatro dimensiones (x, y, x, ict) y $4 \cdot 4 = 16$. Así, construyamos una matriz, es decir, una tabla cuadrada con 16 líneas y 16 columnas. Supongamos, además, que esta matriz es "simétrica" respecto a su diagonal, es decir, que los contenidos de un cuadrado en la línea n y columna m son idénticos con los de un cuadrado en la línea m y columna n. ¿Cuántos cuadrados independientes tendremos? No es difícil de calcular. La matriz tiene en total 16 x 16 = 256 cuadrados. De éstos, 16 pertenecen a la diagonal, lo que les deja en 240. Así, cada área triangular a ambos lados de la diagonal tendrá 120 cuadrados. Como los cuadrados en ambos lados de la diagonal son idénticos, tenemos 120 cuadrados independientes que, con los 16 cuadrados de la diagonal, hacen 136. En la época en que Eddington obtuvo primeramente esta relación, se creía que el valor empírico era 136. Sólo unos años después mediciones más exactas lo elevaron a 137, lo que obligó a Eddington a elaborar una teoría corregida que requería una unidad adicional.

La idea de Eddington fue ridiculizada en un corto artículo de G. Beck, H. Bethe y W. Riezler publicado en el número 9 de enero de 1931 de la revista alemana *Naturwissesschaftes*. Este artículo, que trataba de demostrar lo peligroso que es hacer juegos malabares con los números, decía así:

> *Algunas observaciones sobre la teoría cuántica del punto cero de temperatura.*
>
> *Consideremos un cristal hexagonal. Su punto cero absoluto se caracteriza por la congelación de todos sus grados de libertad excepto, claro está, el movimiento de los electrones en las órbitas de Bohr. Según Eddington, cada electrón posee $1/\alpha = 137$ grados de libertad. Además de los electrones, el cristal contiene también un número igual de protones. Para llegar al punto cero debemos atribuir a cada neutrón (es decir, un protón más un electrón) $2/\alpha$ 1 grados de libertad, puesto que un grado de libertad queda congelado durante el movimiento del electrón en su órbita. Así pues, obtenemos para el punto cero de temperatura*

$$T_0 = -\left(\frac{2}{\alpha} - 2\right)\ grados$$

Suponiendo que 1/α = 137, obtenemos para el punto cero de temperatura:

$$T_0 = -273\ grados$$

lo que coincide exactamente con el valor experimental. Advertimos que nuestro resultado es independiente del cristal escogido.

Desde luego, la relación numérica anterior entre 137 y 273 es una mera coincidencia, porque mientras 137 es un verdadero número puro, el cero absoluto de temperatura puede ser dado por diferentes números, dependiendo de si usamos la escala de temperatura centígrada, la de Réaumur o la de Fahrenheit. Después de la publicación del artículo, el director de la revista, informado por uno de los físicos de Berlín de que era una broma, escribió una carta indignada a los autores, que trabajaban entonces en la Universidad de Cambridge. Recibió una respuesta humilde, diciendo que los autores estaban apenados por la confusión, pero que ellos estaban seguros de que el artículo habría sido considerado como una parodia de la manera con que ciertos físicos construyen sus teorías. Así, el número siguiente de *Naturwissesschaften* publicó una nota del director diciendo que había esperado que todos los lectores comprenderían que el artículo de Beck, Bethe y Riezler era exactamente una parodia. Entonces Sir Arthur Eddington estalló.

Todo esto ocurría hace treinta años, pero todavía hoy no sabemos por qué la cifra es 137 y no otra cualquiera, y si la "explicación" de Eddington es debida a una pura coincidencia o hay una parte de verdad en ella. Desde luego se puede calificar el esfuerzo de Eddington como "numerología" que tiene hoy una significación peyorativa, pero hay una palabra muy próxima: "teoría de los números" que es una extensa y reputada rama de la matemática pura. En sus esfuerzos para resolver los enigmas de la Naturaleza, los físicos suelen buscar el auxilio de la matemática pura y en muchos casos lo obtienen. Cuando Einstein quiso interpretar la gravedad como

la curvatura del espacio de cuatro dimensiones, encontró esperando por él la teoría de Riemann del espacio curvo multidimensional. Cuando Heisenberg buscó alguna clase insólita de matemáticas para describir el movimiento de los electrones dentro de un átomo, un álgebra no conmutativa estaba como preparada especialmente para él. Únicamente la teoría de los números y la topología (analysis situs) siguen siendo puramente disciplinas matemáticas sin ninguna aplicación a la física. No podría ocurrir que recurriésemos a ellas para una comprensión mayor de los enigmas de la Naturaleza?

Pero, volviendo a los problemas de la física del porvenir, sería probable que encontrásemos más dificultades para la explicación de las masas de las partículas elementales que para sus cargas eléctricas. En efecto, cualquiera fórmula que expresara una masa en términos de velocidad (c), acción (h) y una constante numérica debe incluir también una longitud.

Se puede escribir:

$$masa = A \cdot \frac{acción}{velocidad \cdot longitud}$$

en donde A es algún numero racional como 1, √2, 3/5 π, 1/2π^2, etc. Si suponemos que A es 1, la acción igual a h ($6{,}55 \cdot 10^{-27}$) y la velocidad igual a c ($3 \cdot 10^{10}$) y queremos obtener la masa media de una partícula material, es decir, la masa de un mesón ($2 \cdot 10^{25}$) debemos tomar una longitud igual a 10^{-12} cm. Pero, naturalmente, si A no es 1, sino, por ejemplo, 2π (~ 6) o π^2 (~ 10), las longitudes pueden ser tan pequeñas como 10^{-13} cm. Las longitudes de este orden de magnitud son muy comunes en la física de las partículas elementales. El radio de un electrón calculado sobre la base de la teoría electrodinámica clásica es $2{,}8 \cdot 10^{-13}$ cm, mientras que la distancia a que las fuerzas nucleares actúan entre dos partículas se sabe que es $1{,}4 \cdot 10^{-13}$ cm. Así pues, parece que la longitud de varias veces 10^{-13} cm tiene una significación fundamental en los problemas de las partículas elementales.

Durante varias décadas, los físicos teóricos han mantenido la esperanza de que la longitud del orden de 10^{-13}, que habitualmente se llama A desempeñe el papel de longitud elemental en el desarrollo futuro de la teoría. Así como c es la velocidad

más alta posible en la teoría de la relatividad y h es la acción más pequeña posible en la teoría cuántica, A está destinada a ser la distancia más corta posible en la futura teoría de la materia. Será, por así decir, "el diámetro del punto matemático" y no tendrá sentido hablar de distancias más cortas. Esta posibilidad es un sueño muy atractivo e interesante que probablemente será realidad nadie sabe ahora cuándo.

Para dar una conclusión dramática a este volumen, que ha resultado demasiado largo, podemos hablar de una relación "numerológica" más, observada en el campo de las partículas elementales. No podemos comprender lo que significa 137, pero expresamos las masas de todas las partículas elementales en términos de 137 masas de electrón. El resultado se ve en la Tabla I, allí vemos que todas las cifras están muy próximas a números enteros, excepto dos, que son próximas a uno y medio número entero. Puede ser coincidencia, pero las probabilidades de tal coincidencia son de una contra mil millones. Y si no es coincidencia ¿qué significación tiene? ¿Puede ser explicada la serie de los "números sagrados"

19; 17; 16; 13 ½; 7; 2; 1 ½

sobre la base de alguna teoría razonable? Puede ser, por ejemplo, relacionada con la teoría de los números, teniendo alguna conexión con la serie de los números primos o más complicadas series de números? O ¿es mejor relacionarla con la topología, como si tuviera alguna conexión con el número de vértices, aristas, caras y limites espaciales de los poliedros tetradimensionales? No sabemos. Pero esperemos que el trabajo de los físicos de las futuras generaciones darán a estos problemas una victoriosa solución.